



Perception des orientations et intégration multisensorielle

Bérenger Braem

► To cite this version:

Bérenger Braem. Perception des orientations et intégration multisensorielle. Psychologie. Université Charles de Gaulle - Lille III, 2014. Français. NNT : 2014LIL30010 . tel-01146140

HAL Id: tel-01146140

<https://theses.hal.science/tel-01146140>

Submitted on 27 Apr 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université Lille Nord de France

Ecole doctorale des Sciences de l'Homme et de la Société

Laboratoire URECA (EA 1059)

THESE DE DOCTORAT en Psychologie Cognitive

Présentée par **Bérenger Braem**

Perception des Orientations et Intégration Multisensorielle

Soutenue le 31 mars 2014

Membres du jury :

Pr Christine Assaiante, Université d'Aix-Marseille (Rapporteur)

Pr Isabelle Bonan, Université de Rennes (Rapporteur)

Pr Yann Coello, Université Lille 3 (Directeur)

Dr Jacques Honoré, Université Lille 2 (Tuteur scientifique)

Pr Véronique Quaglino, Université d'Amiens (Présidente)

Publications liées aux travaux réalisés au cours de cette thèse

Articles

- Braem**, B., Honoré, J., Rousseaux, M., Saj, A., Coello, Y. (2014). Integration of visual and haptic information in the perception of the vertical in young and old healthy adults and right brain-damaged patient. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, 44, 41-48.
- Saj, A., Honoré, J., **Braem**, B., Bernati, T., Rousseaux, M. (2012b). Time since stroke influences the impact of hemianopia and spatial neglect on visual-spatial tasks. *Neuropsychology*, 26(1): 37-44.

Chapitres d'ouvrages

- Braem** B., Rousseaux M., Coello Y., Honoré J. (2012). Verticale subjective haptique : influence des conditions d'évaluation. In A. Hamaoui, M. Lacour (Eds) : *Du Contrôle postural à l'exécution du mouvement*, pp. 95-103. Paris : De Boeck - Solal. Collection Posture & Equilibre.
- Braem** B., Saj A., Coello Y., Rousseaux M., Honoré J. (2011). Verticales subjectives chez des patients cérébro-lésés droits. In L. Defebvre, M. Lacour (Eds) : *Posture et Locomotion*, pp. 267-276. Marseille : Solal. Collection Posture & Equilibre.

Communications orales

- Braem** B., Honoré J., Saj A., Rousseaux M., Coello Y. (2009). Intégration multimodale dans la perception de la verticale. *Association Posture Equilibre (APE), XVI^e congrès annuel*, Villeneuve d'Ascq (France), 13-14 novembre. ➤ *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology 2009*, 39, 246.
- Braem** B., Saj A., Honoré J., Coello Y., Rousseaux M. (2008). Contribution des signaux visuels et somatosensoriels dans la perception de la verticale chez les patients cérébro-lésés droits. *Société Française de Médecine Physique et Réadaptation, XXIII^e congrès*. Mulhouse (France) 23-25 octobre. ➤ *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique 2008*, 51, 560.
- Braem** B., Saj A., Honoré J., Bernati T., Coello Y., Rousseaux M. (2007). Perception de la verticale chez les patients cérébro-lésés: Apport d'un modèle d'intégration des informations visuelles et haptiques. *APE, congrès annuel*, Paris, 14-15 décembre. ➤ *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology 2007*, 37, 287-288.

Communications affichées

- Braem B., Saj A., Coello Y., Rousseaux M., Honoré J. (2013).** Influence de l'âge sur la perception de la verticale. *Société Francophone Posture Équilibre Locomotion (SOFPEL), XX^e Congrès annuel*. Genève (Suisse), 29 et 30 novembre. ► *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology 2014*, 44, 146.
- Braem B., Coello Y., Rousseaux M., Honoré J. (2013).** The variability of the haptic subjective vertical. *International Symposium Vision, action and concepts: Behavioural and neural basis of embodied perception and cognition*. Lille (France), 28-30 octobre.
- Braem B., Honoré J., Dewaele J., Rousseaux M., Coello Y. (2012).** Dépendance au contexte visuel : le cas de la verticale subjective visuo-haptique. *APE/SOFPEL, XIX^e Congrès annuel*. Marseille (France), 30 novembre et 1^{er} décembre 2012. ► *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology 2012*, 42, 386.
- Braem B., Honoré J., Rousseaux M., Coello Y., Saj A. (2012).** Intégration sensorielle dans la perception de la verticale : le cas des patients cérébro-lésés. *10^e Journée Romande de Neuropsychologie*. Genève (Suisse), 4 octobre 2012.
- Braem B., Honoré J., Rousseaux M. (2011).** Verticale subjective haptique : influence des conditions d'évaluation. *APE, XVIII^e congrès annuel*. Albi (France), 2-3 décembre. ► *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology 2011*, 10, 212-213.
- Braem B., Saj A., Honoré J., Coello Y., Rousseaux M. (2008).** Contribution of visual and somatosensory signals to the perception of the vertical direction in brain damaged patients. *European Neurological Society, 18th Meeting*. Nice (France), 7-11 June. ► *Journal of Neurology*, 255 (suppl. 2), 161.
- Braem B., Saj A., Honoré J., Coello Y., Rousseaux M. (2007).** Vertical perception in right brain-damaged patients : integration of visual and haptic signals. *Réseau Neurosciences LARC, 11^e Journée*, Rennes (France), 12 octobre.
- Braem B., Saj A., Honoré J., Rousseaux M., Coello Y. (2007).** Application d'un modèle statistique d'intégration des informations visuelles et haptiques à la perception de la verticale. *APE, Congrès annuel*, Paris, 14-15 décembre. ► *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology 2007*, 37, 275.

Résumé

La perception de la verticale repose sur l'intégration des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques. Elle est généralement étudiée dans la modalité visuelle (VVS) ou haptique (VHS) et plus rarement dans la modalité visuo-haptique (VVHS). Cette modalité pose la question de l'intégration des informations mises en jeu par ces deux modalités dans la perception multimodale et du modèle cognitif sous-jacent. Se pose également la question de l'effet des lésions cérébrales perturbant la perception spatiale (hémi-négligence) dans la perception de la verticale. Une comparaison des VVS, VHS et VVHS est réalisée dans les quatre premières études de cette thèse, chez des participants sains jeunes et plus âgés et chez des patients cérébro-lésés droits avec ou sans troubles visuo-spatiaux. Les performances observées sont proches de la verticale gravitaire chez les participants sains pour les VVS et VVHS. La VHS (avec la main droite) est déviée, dans le sens horaire chez les jeunes participants et anti-horaire pour les participants plus âgés. La présence d'un cadre visuel perturbe les VVS et VVHS chez les participants dépendants à l'égard du champ. Les patients cérébro-lésés droits présentent une déviation anti-horaire des trois verticales, plus marquée pour la VHS. Les VVHS mesurées sont correctement prédites, dans toutes les conditions, par la somme des VVS et VHS pondérées par leurs précisions relatives. La variance de la VVHS est moindre que les variances des VVS et VHS. La VHS, systématiquement déviée dans ces quatre premières études, fait l'objet d'une évaluation détaillée dans les deux dernières études de cette thèse. Les résultats montrent que la VHS est déviée dans le sens horaire avec la main droite, dans le sens anti-horaire avec la main gauche chez les participants sains jeunes ; les déviations s'inversent avec l'âge. Par ailleurs, les performances sont systématiquement déviées dans le sens des positions initiales. Considérés ensemble, ces résultats montrent que la perception de la verticale implique les informations mises en jeu par les modalités visuelle et haptique mais avec une prépondérance de la première. Ce travail de thèse montre ainsi que la perception de la verticale subjective repose sur une intégration multimodale pondérée des informations sensorielles en accord avec le modèle statistique bayésien du maximum de vraisemblance. Ce mode d'intégration multisensorielle n'est pas altéré par l'âge ou la présence de lésions cérébrales affectant la perception visuo-spatiale. Plusieurs pistes restent à explorer, notamment, le poids de la contribution des informations vestibulaires dans la verticale subjective.

Abstract

The perception of the vertical direction is achieved through vestibular, visual and somatosensory information integration. It is studied in the visual (SVV), haptic (SHV) and less often in the visuo-haptic modality (SVHV). The latter raises the question of the integration of visual the information involved in the visual and haptic modalities and of the cognitive model underlying this integration. SVV, SHV and SVHV were compared in the first four studies of this thesis, in healthy young and older subjects and in right-brain damaged patients with or without visuo-spatial disorders. Performances were closed to the gravity in healthy participants, for SVV as well as for SVHV. VHS, assessed with the right hand, was tilted clockwise in young participants and anti-clockwise in older participants. The presence of a visual frame disrupted SVV and SVHV. The right-brain damaged patients had an anti-clockwise deviation of SVV and SVHV and the SHV was even more tilted. SVHV was well predicted from the sum of the SVV and SHV weighted by their relative variances in all conditions and the SVHV variances were lesser. SHV was evaluated in detail in the two last studies of this thesis because of the systematic tilt in the first four studies. The results show that the SHV is tilted clockwise with the right hand and anti-clockwise with the left hand in young healthy subjects. Moreover, deviations reversed in older group and performances are systematically tilted toward the initial positions in the two groups. Taken together, these results show that the way participants integrate visual and haptic information fits the maximum likelihood model with a greater weighting of information available in visual modality and that ageing and right-brain lesions does not alter the multisensory integration. The weight of vestibular information in the subjective vertical, which has not been evaluated per se in this thesis, needs further investigations.

Remerciements

Je remercie Yann Coello, Professeur de Psychologie, pour ses enseignements, son intérêt pour mes travaux et ses relectures.

Je tiens à remercier particulièrement Jacques Honoré, Chargé de recherche, pour tout le temps qu'il m'a consacré, les rencontres, ses très nombreuses relectures, sa patience, son expérience et tout ce qu'il m'a apporté durant ces années de thèse.

Merci à Christine Assaiante et Isabelle Bonan pour avoir accepté d'évaluer mon travail et à Véronique Quaglino pour avoir accepté de présider ma soutenance.

Merci à Arnaud Saj pour m'avoir transmis ses connaissances en neuropsychologie, m'avoir confié une partie de ses travaux et m'avoir encouragé à les poursuivre en thèse.

Merci à Marc Rousseaux pour la confiance qu'il m'a témoignée en me donnant une place dans la prise en charge des patients dans le service de rééducation neurologique de Swynghedauw.

Merci à la Société Francophone Posture Équilibre et Locomotion (SOFPEL) pour avoir financé une partie de mon travail et pour m'avoir permis d'y présenter régulièrement les résultats.

Merci à l'ensemble des patients et participants pour avoir accepté de coopérer aux différentes études, à toute l'équipe de rééducation de l'hôpital Swynghedauw pour leur soutien et aux membres de l'URECA et du laboratoire de Neurosciences Fonctionnelles et Pathologies pour leur accueil.

Merci à ma femme, Michèle, pour ses encouragements et sa compréhension et à mes enfants, Jonathan et Ambrosia, pour leur patience.

Sommaire

Cadre théorique.....	1
Introduction.....	2
1. Notion de verticale subjective.....	3
1.1. Définition et mesure.....	3
1.1.1. Verticale visuelle subjective.....	4
1.1.2. Verticale haptique subjective.....	5
1.1.3. Verticale visuo-haptique subjective.....	5
1.2. Les systèmes sensoriels impliqués dans la perception de la verticale	6
1.2.1. Le système vestibulaire	6
1.2.2. Le système visuel	8
1.2.3. Le système somesthésique	10
1.3. Données de la littérature concernant les participants sains.....	14
1.3.1. Effets de perturbations vestibulaires sur la verticale subjective	14
1.3.2. Effets de perturbations visuelles sur la verticale subjective.....	19
1.3.3. Effets de perturbations somesthésiques sur la verticale subjective.....	21
1.4. Données de la littérature concernant les patients porteurs de lésions périphériques	23
1.4.1. Effets des lésions du système vestibulaire sur la verticale subjective	23
1.4.2. Effets des lésions du système visuel sur la verticale subjective.....	24
1.4.3. Effets des lésions du système somesthésique sur la verticale subjective.....	25
1.5. Données de la littérature concernant les patients cérébro-lésés	26
1.5.1. Un exemple de désorientation spatiale : la négligence spatiale	26
1.5.2. Déficits	27
1.5.3. Conséquences sur la verticale subjective	29
1.5.3.1. Effets des informations vestibulaires sur la verticale subjective	30
1.5.3.2. Effets des informations visuelles sur la verticale subjective.....	32
1.5.3.3. Effets des informations somesthésiques sur la verticale subjective.....	34
1.5.4. Corrélats anatomiques de la perturbation de la verticale subjective.....	34
2. Intégration des informations sensorielles.....	37
2.1. Cadre théorique	37
2.2. Etudes pionnières	38
2.3. Modèle d'intégration multisensorielle	39
2.4. Application du modèle bayésien d'intégration multisensorielle à la verticale subjective visuo-haptique.....	44
3. Objectifs de la thèse	46

Contributions expérimentales	47
Méthodologie générale.....	49
Première partie expérimentale : Étude des verticales subjectives.....	52
Etude I : Verticales subjectives chez les patients cérébro-lésés droits.....	53
Résumé.....	53
Introduction.....	54
Méthodes.....	56
Résultats	59
Discussion	61
Deuxième partie expérimentale : Intégration multisensorielle et verticale subjective	66
Etude II : Validation du modèle d'intégration multisensorielle pour la perception de la verticale subjective chez les participants sains	67
Résumé.....	67
Introduction.....	68
Méthodes.....	71
Résultats	72
Discussion	77
Etude III : Effet d'une perturbation visuelle sur l'intégration multisensorielle pour la perception de la verticale chez les participants sains	81
Résumé.....	81
Introduction.....	82
Méthodes.....	84
Résultats	87
Discussion	93
Etude IV : Effet de l'âge et d'une lésion cérébrale droite sur l'intégration multisensorielle pour la perception de la verticale	97
Résumé.....	97
Introduction.....	98
Méthodes.....	102
Résultats	105
Discussion	110
Troisième partie expérimentale : Évaluation de la verticale subjective dans la modalité haptique.....	115
Etude V : Effet des conditions d'évaluation sur la perception de la verticale haptique.....	116
Résumé.....	116
Introduction.....	117
Méthodes.....	120
Résultats	121

Etude VI : Effet de l'âge sur la perception de la verticale subjective haptique	128
Résumé.....	128
Introduction.....	129
Méthodes.....	130
Résultats	131
Discussion	131
Discussion Générale	136
La verticale subjective	137
Intégration multisensorielle.....	144
Perspectives.....	148
Références	150
Annexes	157
Annexe 1 : Braem, B., Honoré, J., Rousseaux, M., Saj, A., Coello, Y. (2014). Integration of visual and haptic information in the perception of the vertical in young and old healthy adults and right brain-damaged patient. <i>Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology</i> , 44, 41-48.	158
Annexe 2 : Saj, A., Honoré, J., Braem, B., Bernati, T., Rousseaux, M. (2012b). Time since stroke influences the impact of hemianopia and spatial neglect on visual-spatial tasks. <i>Neuropsychology</i> , 26(1): 37-44.....	167

Cadre théorique

Introduction

La perception de l'espace désigne l'ensemble des processus nécessaires à la localisation des objets et aux actions pour les saisir ou les éviter. A ces fins, le codage de l'espace par rapport au corps ou par rapport à une référence extérieure est indispensable (Howard, 1982). Dans le premier cas, le codage des propriétés de l'espace est qualifié d'égocentré alors que, dans le second cas, le codage est allocentré. La verticale gravitaire est une référence allocentrée primordiale, définie comme la force physique qui attire vers le centre de la terre les objets sous l'effet de leur masse. C'est, par exemple, la direction que prend le fil à plomb. Le corps est également soumis à cette force et adopte en réaction une posture érigée qui correspond à la verticale posturale. Cette réaction posturale est rendue possible par la présence d'indices gravitaires détectés par les systèmes vestibulaire, visuel et somesthésique. L'intégration de ces indices gravitaires permet également la construction de la représentation interne de la verticale gravitaire ou verticale subjective (VS). Cette représentation constitue une référence pour se représenter l'espace et y agir. Les conditions de l'intégration des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques sont toujours débattues et constituent le thème de ce travail de thèse.

La partie théorique de ce travail de thèse comporte en trois volets. Dans un premier temps, nous y présentons les modalités d'évaluation de la verticale subjective et les systèmes sensoriels impliqués dans son élaboration. Les performances des participants sains et des patients cérébro-lésés droits ou avec un déficit sensoriel seront présentées dans des situations naturelles ou dans des conditions expérimentales modifiant un type d'informations sensorielles. Ces études mettent en évidence le rôle des informations sensorielles dans la construction de la perception de la verticale et suggèrent que l'intégration multisensorielle est nécessaire dans la perception de la verticale. Dans un second temps, un modèle d'intégration multisensorielle est présenté. Ce modèle suggère que le système nerveux central intègre les informations sensorielles redondantes en les pondérant (ces notions de pondération et de poids correspondent à la contribution relative d'un système sensoriel

par rapport aux autres) selon leur précision relative. Donnant ainsi plus d'importance aux informations les plus précises (ce terme est employé comme indicateur de l'erreur variable d'une mesure, c'est-à-dire que plus un système est précis, moins son erreur variable est grande), il améliorerait sa précision. Le système nerveux central connaîtrait, *a priori*, l'efficacité des systèmes sensoriels dans l'évaluation des propriétés des objets. Ce modèle bayésien, apparenté au maximum de vraisemblance est déjà utilisé dans le cadre de la perception de la taille des objets par exemple. Cette seconde partie présentera donc les études pionnières sur la perception des propriétés des objets dans des estimations multimodalitaires. La procédure d'application du modèle à la perception de la verticale dans la modalité visuo-haptique sera objectivée. Les objectifs de la thèse sont détaillés dans un troisième temps.

1. Notion de verticale subjective

1.1. Définition et mesure

La verticale subjective est une composante fondamentale de la construction de l'espace. Elle fait partie, avec les verticales gravitaire et posturale, des trois types de verticales distinguées par Gibson (1952). Elle correspond à la représentation interne de la verticale gravitaire qu'un individu élabore à partir de ses sens vestibulaire, visuel et somesthésique (Bronstein, 1999 ; Mazibrada *et al.*, 2008 ; Mergner et Rosemeier, 1998). L'intégration de ces informations serait réalisée au niveau du tronc cérébral et dans les hémisphères cérébraux au niveau cortical (Brandt *et al.*, 1994 ; Yelnik *et al.*, 2002 ; Bronstein *et al.*, 2003 ; Pérennou *et al.*, 2008). Son évaluation ne pose pas de difficulté particulière et repose sur la mise en place d'une méthodologie bien connue maintenant. Généralement, les participants doivent aligner un objet avec la verticale gravitaire dans les modalités visuelle, haptique ou visuo-haptique. Les personnes sans trouble neurologique ont des

performances proches de la verticale gravitaire alors que les patients souffrant d'un déficit visuo-spatial d'origine neurologique ont des performances déviées dans le sens horaire ou anti-horaire.

La VS est le plus souvent évaluée en demandant aux participants d'aligner une barre avec la verticale gravitaire. Néanmoins, certaines études l'évaluent en utilisant l'ajustement d'un cadre lumineux (Witkin et Asch, 1948a), d'une baguette équipée de haut-parleurs à ses extrémités (VS auditive, Barneveld *et al.*, 2011), ou du corps propre (verticale posturale ou VP, *e.g.* Barbieri *et al.*, 2010). L'évaluation standard de la VS nécessite le respect de certaines contraintes comme une obscurité totale, l'absence d'indices spatiaux et une posture naturelle, c'est-à-dire stable et avec la tête dans l'axe du tronc, afin d'éviter les effets des conflits sensoriels qui seront développés plus bas. Les modalités visuelle et haptique sont largement utilisées pour l'étude la verticale subjective ; la modalité visuo-haptique est utilisée par notre équipe depuis 2005. Ces trois modalités sont décrites ci-dessous.

1.1.1. Verticale visuelle subjective

Dans la modalité visuelle (Figure 1.1 à gauche), la verticale subjective est mesurée dans l'obscurité complète avec une barre lumineuse que les participants, yeux ouverts, doivent aligner avec la verticale gravitaire au moyen de commandes verbales (*e.g.* Bohmer et Mast, 1999), d'un joystick (*e.g.* Luyat *et al.*, 1997) ou de boutons (*e.g.* Yelnik *et al.*, 2002). Dans cette tâche, un individu sain placé dans des conditions naturelles obtient des performances proches de la verticale objective (Mann, 1952 ; Witkin et Asch, 1948b). Plus précisément, la verticale subjective visuelle (VVS) serait comprise entre $-2,5^\circ$ et $+2,5^\circ$, intervalle (moyenne ± 2 écarts-types) proposé par Pérennou *et al.* (2008) sur la base des performances de 33 participants sains ($48,8 \pm 10,8$ ans) qui devaient ramener à dix reprises (cinq dans le sens horaire et cinq dans le sens anti-horaire) une barre

de 15 cm présentée sur un écran d'ordinateur.

1.1.2. Verticale haptique subjective

Dans la modalité haptique (Figure 1.1 à droite), la verticale subjective est également mesurée dans l'obscurité complète, mais avec une barre non visible. Le participant utilise sa main, généralement la main préférée, pour ajuster la barre avec la verticale gravitaire (*e.g.* Luyat *et al.*, 2001). Cette verticale haptique subjective (VHS) serait comprise entre $-4,5^\circ$ et $+4,5^\circ$ avec une barre de 25 cm (Pérennou *et al.*, 2008), valeurs calculées selon la méthode décrite ci-dessus (23 participants réalisent la tâche avec la main droite et 10 avec la main gauche).

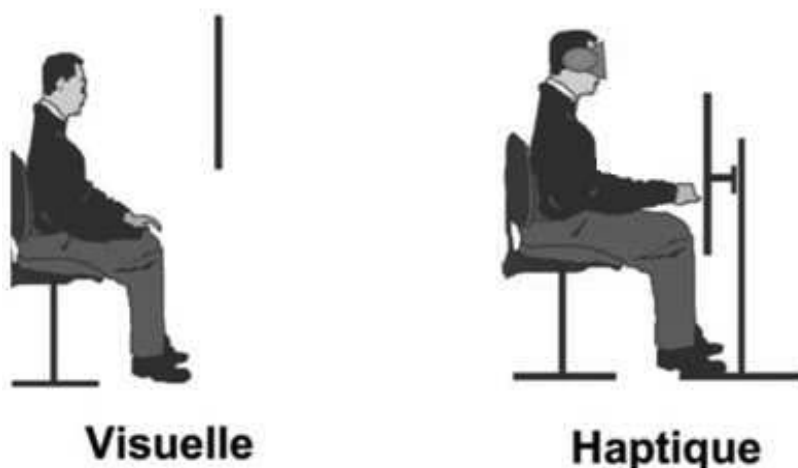


Figure 1.1 : Evaluation de la verticale subjective dans les modalités visuelle et haptique (d'après Pérennou, 2005, modifié).

1.1.3. Verticale visuo-haptique subjective

Notre équipe utilise depuis 2005 une modalité mixte dans l'étude de la VS des patients cérébro-lésés (Saj *et al.*, 2005a, b, c ; Figure 2). Les participants sont placés dans l'obscurité et la barre est lumineuse. Les ajustements sont réalisés avec la main droite. Cette modalité visuo-haptique (VVHS) pose la question de l'intégration des informations sensorielles ainsi que du

modèle cognitif qui la sous-tend. Aucune étude n'a proposé d'intervalle de « normalité » pour la VVHS.

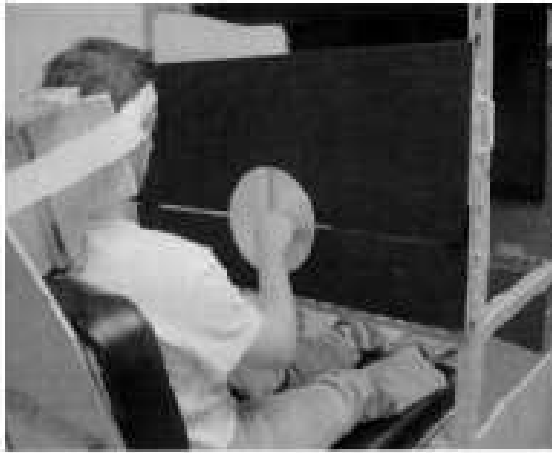


Figure 1.2 : Evaluation de la verticale subjective dans la modalité visuo-haptique (d'après Saj *et al.*, 2006a)

En conclusion, différentes modalités permettent d'évaluer la perception de la verticale ainsi que la participation des systèmes sensoriels impliqués par le biais de procédures expérimentales spécifiques qui seront détaillées dans la partie 1.4. La section qui suit décrit les systèmes vestibulaire, visuel et somesthésique ainsi que leurs relations.

1.2. Les systèmes sensoriels impliqués dans la perception de la verticale

Cette partie décrit les systèmes sensoriels qui participent à la perception de la verticale. La description des récepteurs sensoriels précède la présentation des projections corticales.

1.2.1. Le système vestibulaire

Le vestibule, organe de l'équilibre, détecte les déplacements de la tête et sa position dans le champ de gravité. Les informations qu'il apporte contribuent à la stabilisation du regard et au contrôle postural. Situé dans le labyrinthe de l'os temporal, il est constitué des organes otolithiques,

utricule et saccule, sensibles aux accélérations linéaires et des canaux semi-circulaires, sensibles aux accélérations angulaires. Le système utriculo-sacculaire est formé de deux cavités horizontale et verticale, renfermant une macule formées de cellules ciliées et d'otolithes (cristaux de carbonate de calcium). Les accélérations linéaires provoquent un déplacement des otolithes dans le sens inverse, entraînant une dépolarisation des cils et un potentiel d'action au niveau des fibres nerveuses. Les canaux semi-circulaires sont grossièrement orthogonaux deux à deux : quand la tête est droite, le canal horizontal est incliné d'environ 30° en arrière et les canaux antérieur et postérieur sont verticaux. Chaque canal comporte un renflement, l'ampoule, située à proximité de l'utricule. Dans cette ampoule se trouvent les cellules ciliées, qui baignent dans l'endolymphe. Elles sont toutes orientées dans la même direction. En fonction des mouvements du corps et de la tête, le déplacement relatif des cils et du corps des cellules ciliées provoque leur dépolarisation. L'organisation anatomique des organes otolithiques et des canaux semi-circulaires permet la détection des accélérations linéaires et angulaires dans toutes les directions de l'espace.

Les potentiels d'action qui parcourent les fibres nerveuses vestibulaires atteignent les noyaux vestibulaires au niveau du tronc cérébral. Ces noyaux sont un lieu d'intégration d'informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques. Ils participent en particulier à la coordination des mouvements des yeux grâce au réflexe vestibulo-oculaire et à l'équilibre dynamique du corps. Les projections se répartissent ensuite en quatre ensembles : le système vestibulo-spinal, le système vestibulo-oculaire, le système vestibulo-cérébelleux et le système vestibulo-cortical après un relais par la partie ventrale postérieure du thalamus. Ce dernier système projette dans des régions corticales très étendues, incluant la jonction temporo-pariétal, le cortex insulaire postérieur, le sillon intra pariétal, le lobule pariétal inférieur, le lobule temporal supérieur les aires frontales, l'hippocampe et les gyri parahippocampique et cingulaire. Ces aires sont activées simultanément lors de la stimulation vestibulaire, sans qu'on puisse distinguer un cortex vestibulaire primaire (de Waele *et al.*, 2001) et renvoient des afférences au niveau des noyaux

vestibulaires. Elles sont activées lors de la stimulation calorique ou galvanique mais également lors de stimulations visuelle ou somesthésique, ce qui suggèrent que les régions corticales vestibulaires participent à l'intégration des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques (Lopez *et al.*, 2005).

1.2.2. Le système visuel

Le système visuel permet de connaître rapidement et précisément la taille, la forme, la couleur ou la direction des objets en déplacement. Les yeux, qui en constituent les capteurs, ont la forme d'une sphère, tapissée d'une structure neuronale sensible à la lumière, la rétine. Avant d'atteindre la rétine, la lumière traverse la cornée, l'humeur aqueuse, puis le cristallin et enfin l'humeur vitrée. La rétine contient six types de neurones y compris les deux types de photorécepteurs, cônes et bâtonnets. Les bâtonnets ont un seuil d'activation très bas. Les cônes ont quant à eux un seuil plus élevé et ils sont responsables de la détection des couleurs grâce aux pigments qu'ils contiennent, sensibles au bleu, au rouge ou au vert. Environ 120 millions de bâtonnets et 6 millions de cônes sont répartis à la surface de la rétine. La densité des photorécepteurs et la proportion cônes/bâtonnets diminue avec l'excentricité. La fovéa, partie centrale de la rétine contient environ 200 fois plus de cônes et le segment externe de ces cônes est plus étroit. Ce sont les 200000 cônes au mm² au niveau de la fovéa qui permettent une acuité maximale, diminuant rapidement en périphérie. De plus, alors qu'au centre de la rétine, un photorécepteur est connecté à une cellule bipolaire, elle-même connectée à une cellule ganglionnaire, la rétine périphérique est caractérisée par une convergence qui croît avec l'excentricité : les cellules d'un niveau donné sont innervées par plusieurs cellules du niveau précédent.

Les terminaisons nerveuses empruntent le nerf optique et les fibres issues de l'hémi-rétine

nasale croisent dans le chiasma optique alors que les fibres de la rétine temporale continuent du même côté vers le thalamus. Au-delà du chiasma, les bandelettes optiques contiennent des fibres qui proviennent des deux yeux et qui s'épuisent dans les corps genouillés latéraux. Les neurones de ce relais thalamique atteignent les aires visuelles primaires (aires V1 ou 17 de Brodmann) via les radiations optiques. Cette voie géniculostriée représente 80% des fibres visuelles et participe à la perception visuelle. Les 20% restants passent par les colliculus supérieurs (régulation des mouvements de la tête et des yeux), le prétectum (réflexe pupillaire) et l'hypothalamus (régulation des rythmes circadiens). Les neurones des aires primaires sont organisés en colonnes et ont la particularité de répondre préférentiellement à des orientations données. Une autre particularité de ces neurones est la binocularité, c'est-à-dire qu'ils reçoivent les afférences des deux yeux, ce qui permet la vision en profondeur, en relief.

Au-delà de V1, le traitement de l'information visuelle se poursuit dans de nombreuses aires des lobes occipital, temporal et pariétal. Plus de 30 aires sont impliquées dans la vision (Felleman et Van Essen, 1991). La surface corticale dévolue au traitement visuel 'strict' (V1 à V4) est de l'ordre de 15% (Bullier, 1998); bien davantage si l'on considère les aires multisensorielles et oculomotrices. A partir de V2, ces aires s'organisent selon deux grandes voies (Milner et Goodale, 1992). La première, occipito-temporale, se termine dans la partie inférieure du lobe temporal. Cette voie est impliquée dans la perception des formes et la reconnaissance des objets : c'est la voie ventrale, ou voie du 'quoi ?'. La seconde voie, occipito-pariétale, se termine dans la partie postérieure du lobe pariétal. Cette voie est impliquée dans la perception des mouvements des objets et des relations spatiales qu'ils entretiennent : c'est la voie dorsale, ou voie du 'où'. La distinction fonctionnelle entre ces deux voies a d'abord été mise en évidence chez le singe (Pohl, 1973). Entraînés à des tâches de reconnaissance de la position ou de la forme d'un objet, les animaux subissent ensuite une lésion bilatérale du cortex inféro-temporal ou du cortex pariétal. Dans le premier cas, les singes présentent un déficit spécifique de la reconnaissance des objets alors qu'ils

restent capables d'en reconnaître la position spatiale. Dans le second cas, c'est l'inverse. Cette dichotomie fonctionnelle est confirmée chez l'homme par l'observation des déficits consécutifs à des lésions cérébrales, avec une agnosie visuelle lors de lésions ventrales et des déficits visuo-spatiaux lors de lésions dorsales. Dans le premier cas, la dénomination d'un objet est impossible sur la base des informations visuelles mais le comportement de saisie est préservé, alors que dans le second cas, c'est la saisie d'un objet qui devient maladroite ou impossible (ataxie optique, Vighetto, 1998). Ce modèle a été étoffé par Milner et Goodale (1995) qui proposent que la voie dorsale est également la voie du 'comment' pour les interactions physiques avec les objets présents dans l'espace péripersonnel.

1.2.3. Le système somesthésique

Le système somesthésique trouve son point de départ au niveau des récepteurs somesthésiques cutanés et sous-cutanés répartis à la surface et à l'intérieur de l'ensemble du corps. Ces récepteurs somesthésiques sont morphologiquement et fonctionnellement variés. On distingue les mécanorécepteurs, les nocicepteurs et les thermorécepteurs. Les deux derniers types, détectent respectivement la douleur et la température, ne seront pas développés dans ce travail de thèse. Les mécanorécepteurs détectent quant à eux les vibrations et les pressions. Malgré des différences morphologiques, les mécanorécepteurs fonctionnent de manière identique : les stimuli provoquent une déformation de la terminaison nerveuse donnant naissance à un potentiel d'action. La fréquence des potentiels d'action code l'intensité du stimulus alors que l'emplacement du stimulus est déterminé par la localisation des projections corticales. Les mécanorécepteurs répondent à des stimuli externes et internes à la base de l'extéroception, de l'intéroception et de la proprioception. L'extéroception concerne les pressions exercées sur la peau et de la stimulation des récepteurs cutanés. Ce sens tactile apporte des indices sur l'orientation du corps grâce aux pressions appliquées

sur les surfaces de support (Benson, 1990). Les surfaces de support les plus discriminantes pour l'orientation corporelle sont situées au niveau de la plante des pieds (Roll *et al.*, 2002). L'intéroception provient de la force gravitaire exercée sur les récepteurs sensoriels du mésentère et des organes internes (foie, estomac, intestins ...). La position de ces organes varie en fonction de leur poids et de la position du sujet (Clark et Graybiel, 1963) et informe le sujet de son orientation par rapport à la gravité (Trousselard *et al.*, 2004). La proprioception est basée sur la sensibilité profonde de l'appareil moteur qui code pour le sens kinesthésique. Les récepteurs, essentiellement répartis dans les systèmes musculo-squelettique et articulaire, détectent les étirements musculaires et la position des articulations et permettent la perception de la position spatiale des membres, des autres parties du corps et de leur tonus. Ils informent également sur l'orientation statique relative des différentes parties du corps et sur leurs déplacements (Dietz, 1992). Le système somesthésique permet également l'exploration tactile active (sens haptique) grâce aux mouvements relatifs entre la peau et la surface explorée. Chez l'homme, l'exploration haptique est le plus souvent réalisée par la main, la bouche et notamment les lèvres chez l'enfant. Elle améliore la perception de propriétés physiques des objets manipulés comme la forme, la taille, la texture ou l'orientation.

Les potentiels d'action provoqués par l'activation des récepteurs somesthésiques sont transmis par les fibres afférentes dont le corps cellulaire se trouve dans le ganglion spinal ou dans le ganglion de Gasser. L'information sensorielle provenant de l'ensemble du corps et de la partie postérieure de la tête monte ipsilatéralement par les colonnes dorsales jusqu'à un second neurone au niveau du bulbe caudal. L'information sensorielle franchit la ligne médiane et emprunte le lémnisque médian vers un troisième neurone dans le noyau ventro-postéro-latéral du thalamus. L'information sensorielle provenant de la face atteint le noyau ventro-postéro-médian du thalamus en passant par la voie trigéminal. Le complexe ventral postérieur du thalamus comporte une représentation complète de la sensibilité du corps. Les neurones du thalamus projettent vers le cortex somesthésique primaire situé dans le lobe pariétal antérieur (aires 1, 2, 3a et 3b de

Brodmann). La représentation corticale du corps somesthésique, historiquement déterminée par Penfield et Rasmussen en 1950, ne conserve pas les proportions réelles du corps : la représentation du visage et des mains est surdimensionnée par rapport à celle du reste du corps. Le langage articulé, l'expression des émotions et la manipulation des objets nécessitent en effet d'abondantes réafférences et une circuiterie cérébrale plus développée. Enfin, les informations somesthésiques et proprioceptives convergent d'une part vers le cortex somesthésique secondaire (postérieur à l'aire somesthésique primaire) puis vers l'amygdale et l'hippocampe (rôle dans l'apprentissage et la mémoire tactile) et d'autre part vers le cortex moteur. Le cortex moteur projette à son tour vers les cortex somesthésiques dans des aires corticales associatives intégrant les informations motrices et somesthésiques afin d'élaborer les comportements adaptés.

Le sens haptique qui sera utilisé dans la partie expérimentale, met en jeu la kinesthésie et le tact résultant de la stimulation de la peau provoquée par les mouvements actifs de la main lors de l'exploration d'un objet par exemple (Loomis et Lederman, 1986). Lederman et Klatzky (1993) décrivent un ensemble de procédures d'exploration stéréotypées, systématiquement utilisées pour évaluer les différentes propriétés des objets, comme les mouvements latéraux pour les textures ou le suivi des contours pour les formes globales (figure 1.9). Ces procédures sont automatiquement réalisées dès que les auteurs demandent aux participants d'évaluer une propriété en particulier. Elles s'avèrent « insuffisantes », « suffisantes », « optimales » ou « nécessaires » selon la propriété à évaluer. Par exemple, la perception de la température est possible à partir de mouvements latéraux, mais elle est optimale pour une position statique de la main sur l'objet. Autre exemple, la perception de la forme globale d'un objet nécessite un mouvement de suivi du contour et les autres procédures se révèlent insuffisantes. Par ailleurs, ces différentes procédures ont des durées plus ou moins longues, du dixième de seconde pour la perception de la température à plusieurs secondes pour la perception de la forme. Alors que les propriétés matérielles des objets comme la texture sont perçues très rapidement, les propriétés géométriques, comme la forme, nécessitent un temps

d'exploration plus important et la mise en relation d'informations acquises successivement. Ainsi, pour la perception des propriétés géométriques des objets, y compris leur orientation, la modalité haptique apparaît suffisante mais pas optimale. Selon Lederman et Klatzky (1993), c'est la modalité visuelle qui est optimale dans ce cas.

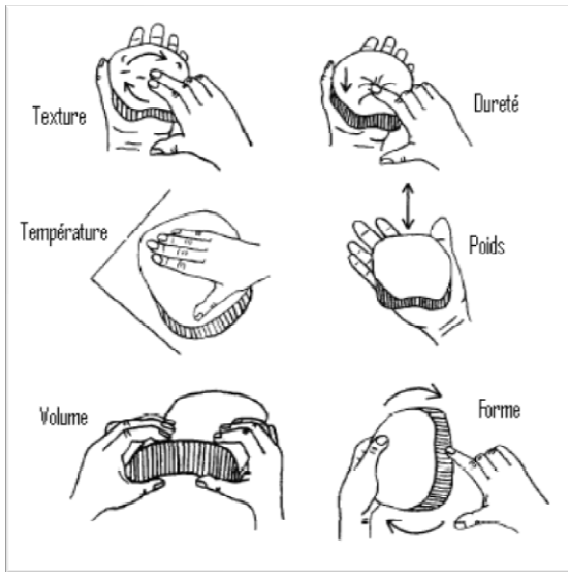


Figure 1.9 : Mouvements stéréotypés de la modalité haptique en fonction de la propriété à évaluer (extrait de Ledermann et Klatzky, 1993, modifié).

En conclusion, les systèmes vestibulaire, visuel et somesthésique possèdent des récepteurs permettant la perception des indices gravitationnels. Les projections corticales de ces systèmes passent par le thalamus, ou de nombreux noyaux participent à l'interconnexion entre le système vestibulaire et les cortex moteurs, sensitifs, proprioceptifs, auditifs et visuels. Au niveau cortical, le cortex vestibulaire pariéto-insulaire, situé au niveau de la jonction temporo-pariétal et de l'insula postérieure chez l'homme, ainsi que le gyrus temporal supérieur, reçoivent un grand nombre d'afférences vestibulaires (pour revue, Lopez *et al.*, 2005). Par ailleurs, Guldin et Grüsser (1998) ont montré que ces aires corticales répondaient aux stimulations vestibulaires bilatérales, mais aussi aux stimulations visuelles et proprioceptives suggérant l'importance de ces aires dans l'intégration

multisensorielle. Ainsi, une stimulation sensorielle appliquée à l'un de ces systèmes provoque un conflit sensoriel dont les conséquences au niveau de la perception de la verticale sont décrites dans la section suivante.

1.3. Données de la littérature concernant les participants sains

La VS est en moyenne proche de la VG chez le sujet sain placé en position normale (Mann, 1952 ; Witkin et Asch, 1948b). Dans cette position normale, les informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques sont redondantes, sans asymétrie. Dans ces conditions, il est difficile d'évaluer le poids d'un système sensoriel en particulier. Il est nécessaire d'utiliser des procédures expérimentales qui provoquent une asymétrie des informations sensorielles ou un conflit entre les différents systèmes sensoriels pour montrer l'importance d'un système sensoriel dans la VS. Cette partie décrit les effets de perturbations vestibulaire, visuelle et somesthésique sur la perception de la verticale chez les participants sains.

1.3.1. Effets de perturbations vestibulaires sur la verticale subjective

La stimulation du système vestibulaire peut provoquer un déséquilibre sensoriel et un conflit avec les informations visuelles et somesthésiques laissées inchangées. La stimulation directe des récepteurs vestibulaires peut être réalisée par le biais de stimulations caloriques. Cependant, cette méthode est limitée car l'irrigation des conduits auditifs ne permettrait qu'une activation des canaux semi-circulaires horizontaux (Lopez *et al.*, 2005). Une autre méthode pour stimuler le système vestibulaire consiste en l'utilisation de stimulations galvaniques. Un courant d'intensité faible (1 à 7 mA) entre deux électrodes posées sur la partie inférieure des mastoïdes (stimulation bilatérale) ou

entre une électrode frontale et une électrode posée sur la partie inférieure d'une mastoïde (stimulation bilatérale), entraînent une activation vestibulaire du côté de la cathode et une inhibition du côté de l'anode. Lors de telles stimulations, la VVS est déviée vers l'anode (Tardy-Gervet et Séverac-Cauquil, 1998 ; Zink *et al.*, 1998). La déviation augmente avec l'intensité de la stimulation (Figure 1.3 : Zink *et al.*, 1998). Par ailleurs, la stimulation galvanique provoque chez le sujet sain, une réaction posturale, une torsion oculaire tonique ainsi qu'un nystagmus. Zink *et al.* (1998) en déduisent que les stimulations galvaniques affectent les canaux semi-circulaires ainsi que les saccules et utricules. Ces données suggèrent que la représentation de la verticale peut être modifiée en créant un déséquilibre entre les informations vestibulaires droites et gauches et en générant un conflit entre les informations vestibulaires modifiées et les autres informations restées inchangées. Cependant, il est probable que la réaction posturale, la torsion oculaire ou le nystagmus participent à la déviation de la VS. Ces résultats sont à mettre en relation avec ceux observés lors d'une lésion vestibulaire unilatérale qui seront discutés ultérieurement.

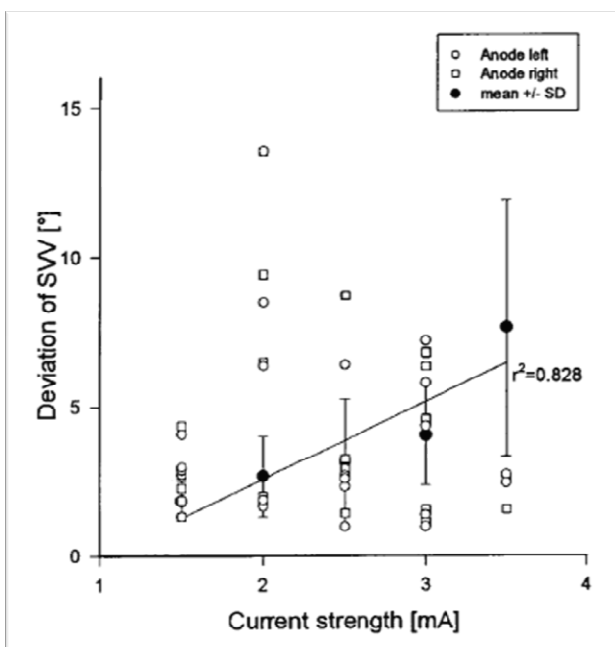


Figure 1.3 : Déviation de la VVS en fonction de l'intensité de la stimulation galvanique (d'après Zink *et al.*, 1998).

Une stimulation indirecte des informations vestibulaires peut être obtenue en variant la position du corps (ou de la tête) du sujet, même s'il est possible d'attribuer une partie des effets observés à des modifications somesthésiques. Diener et Dichgans (1988) étudient les effets de variations des vestibulaires, visuelles et somesthésiques sur la posture de participants sains debout sur une plate-forme en mouvement (de 0,3 et 1 Hz). Ces auteurs font varier la position de la tête de chaque participant : tête droite, tête penchée en avant ou en arrière (30°) ou tête penchée sur le côté (45°). Ils montrent que les variations du centre de gravité sont plus importantes quand les participants ont la tête en arrière et les yeux fermés, que dans la position tête droite les yeux fermés, ce qui signifie que le contrôle de la posture est plus difficile quand la tête est penchée en arrière. Les auteurs de cette étude supposent que le système vestibulaire est moins sensible à la perception des indices gravitationnels quand la tête est penchée en arrière. Certains auteurs proposeront par la suite l'hypothèse que la position allongée produit le même effet. Ainsi, pour Pizzamiglio *et al.* (1997) les troubles visuo-spatiaux observés en présence d'un déséquilibre vestibulaire d'origine neurologique devraient diminuer en position allongée (figure 1.12). Leur modèle propose que ces troubles visuo-spatiaux sont provoqués par une asymétrie des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques. En position allongée, le poids du système vestibulaire serait réduit, ainsi que l'impact de l'asymétrie pathologique des informations vestibulaires et, de ce fait, les troubles visuo-spatiaux.

Luyat *et al.* (1997) ont testé l'effet de la position du corps sur la perception de la verticale. Dans cette étude, les participants doivent aligner la barre lumineuse avec la verticale gravitaire dans les positions debout et assise. Dans la position debout, les participants sont soit placés de manière libre la plus confortable, soit un pied devant l'autre. Les participants assis sont soit placés de manière libre, soit parfaitement immobilisés. Les résultats ne montrent pas de différence significative entre les VVS obtenues dans les différentes postures. Les auteurs en concluent que la dynamique posturale n'est pas nécessaire pour estimer la direction de la verticale et que la

perception de la verticale est un processus passif. De même, Guerraz *et al.* (2000) ne montrent pas de différence notable entre les VHS obtenues chez les participants sains assis ou allongés.

La position allongée s'accompagnerait d'une diminution de l'influence vestibulaire et d'un effet sur la VS, mais aucune des deux études citées ne valide cette hypothèse. Il semble cependant difficile de montrer l'effet de la diminution de l'influence vestibulaire sur la VVS ou la VHS dans les conditions standard. L'absence de conflit entre les différentes informations sensorielles, ainsi que la présence d'informations vestibulaires similaires à droite et à gauche pourrait être une raison de l'absence d'effet de la position allongée sur la VS chez les participants sains.

Si le passage de la position assise à la position allongée (inclinaison en tangage) ne semble pas modifier la VS chez les participants sains, les inclinaisons du corps en roulis provoquent systématiquement des changements. Les inclinaisons inférieures à 60° provoquent une déviation de la VS du côté opposé à l'inclinaison : c'est l'effet Müller ou effet E. À l'opposé, si l'inclinaison du corps en roulis est supérieure à 60°, alors la VS est déviée dans le sens de l'inclinaison : c'est l'effet Aubert ou effet A. La déviation maximale dépend de l'effet (Figure 1.4) : elle excède rarement 8° pour l'effet Müller alors qu'elle peut atteindre 20° quand le sujet est incliné à 90° (Witkin et Asch, 1948b ; Bauermeister *et al.*, 1964). Ces effets semblent pouvoir être expliqués par une activation déséquilibrée des vestibules droit et gauche. Cependant, l'inclinaison en roulis modifie également les pressions exercées sur la peau et provoque un déséquilibre somesthésique.

L'inclinaison de la tête seule provoque les mêmes effets E et A (Witkin et Asch, 1948b) bien que l'effet Müller provoqué soit plus important que celui obtenu par une inclinaison corporelle complète. Ces effets ne peuvent donc pas être attribués uniquement à la somesthésie corporelle puisque dans cette dernière condition, seuls les vestibules et les mécanorécepteurs du cou stimulés. L'inclinaison effective n'est cependant pas une condition nécessaire à l'apparition d'un effet sur la VS. Mertz et Lepecq (2001) ont en effet montré que chez des participants capables de s'imaginer

inclinés avec des amplitudes d'en moyenne 25° , l'effet Müller est aussi observé mais avec des déviations moyennes de la verticale subjective d'environ de $2,5^\circ$ (Figure 1.5). En absence d'inclinaison effective et donc de déséquilibre vestibulaire ou somesthésique, ces auteurs suggèrent l'existence d'une composante cognitive de haut niveau dans l'apparition des effets E et A.

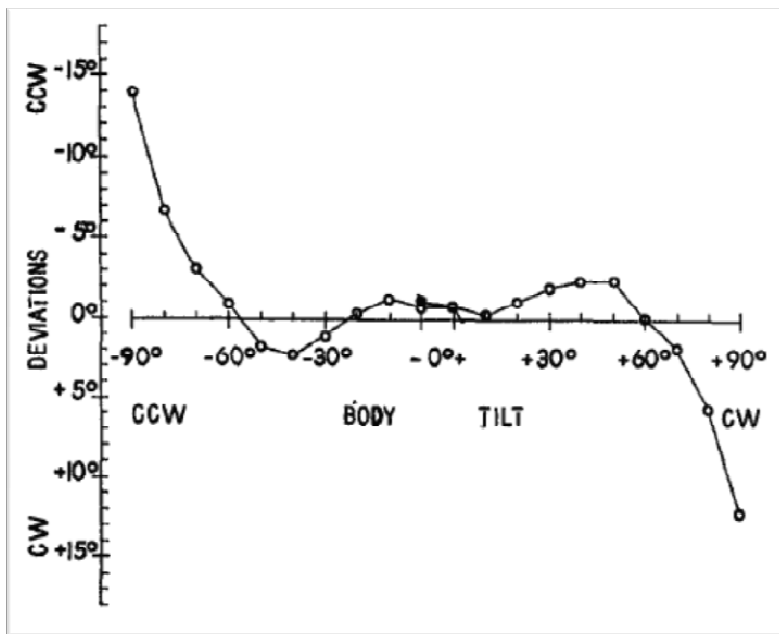


Figure 1.4 : VVS en fonction de l'inclinaison (clock-wise, CW ou horaire et counter-clock-wise, CCW ou anti-horaire) du corps (body tilt) (d'après Bauermeister, 1964, modifié)

1.3.2. Effets de perturbations visuelles sur la verticale subjective

Il est possible de créer un conflit entre les informations visuelles d'une part et les informations vestibulaires et somesthésiques d'autre part, en plaçant par exemple un cadre incliné autour de la barre à ajuster : il s'agit du test du cadre et de la barre (*rod-and-frame test* ou RFT). Asch et Witkin (1948b) appliquent une rotation de 22° à un cadre visuel vers la droite ou vers la gauche et le participant, assis, doit aligner une barre lumineuse avec la verticale gravitaire. Les auteurs observent une inclinaison de la VS de 15° dans le sens de la déviation du cadre. L'erreur d'ajustement n'est toutefois pas retrouvée chez tous les participants. Les auteurs en déduiront deux styles perceptifs différents. Les participants qui commettent des erreurs d'appréciation de la

verticale en présence d'un contexte visuel incliné sont dits dépendants à l'égard du champ, les autres, indépendants à l'égard du champ. La proportion de participants dépendants à l'égard du champ a été estimée à 30% de la population normale (Crémieux et Mesure, 1994).

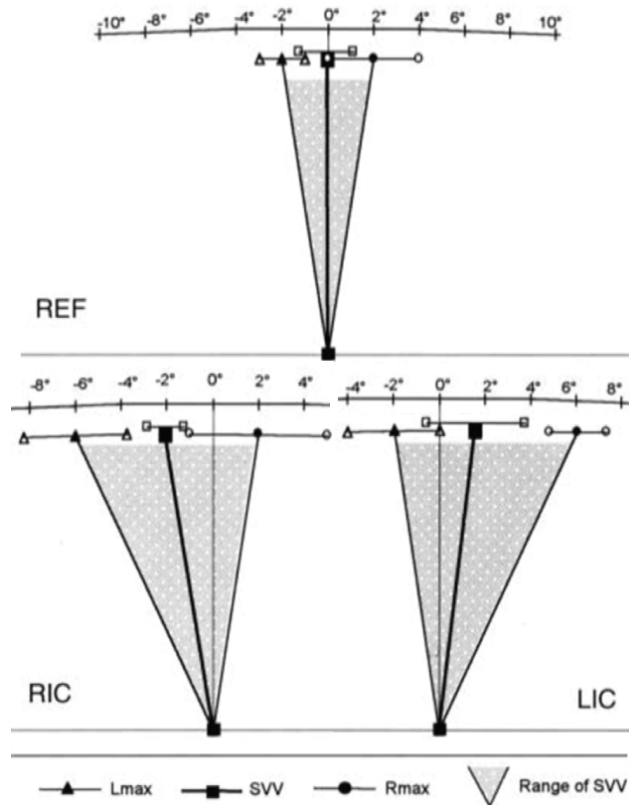


Figure 1.5 : VVS dans les conditions normale (REF), imaginée inclinée vers la gauche (LIC) et vers la droite (RIC). D'après Mertz et Lepecq, 2001.

Selon Beh *et al.*, (1971), les erreurs d'ajustement se feraient en direction d'un des axes principaux du cadre, en fonction de sa proximité avec la verticale gravitaire (Figure 1.6). Beh et Wenderoth (1972) ont montré que l'effet cadre était présent pour d'autres formes géométriques comme le triangle ou l'hexagone, avec une déviation de la verticale subjective en direction de l'axe le plus proche de la verticale gravitaire (Figure 1.7).

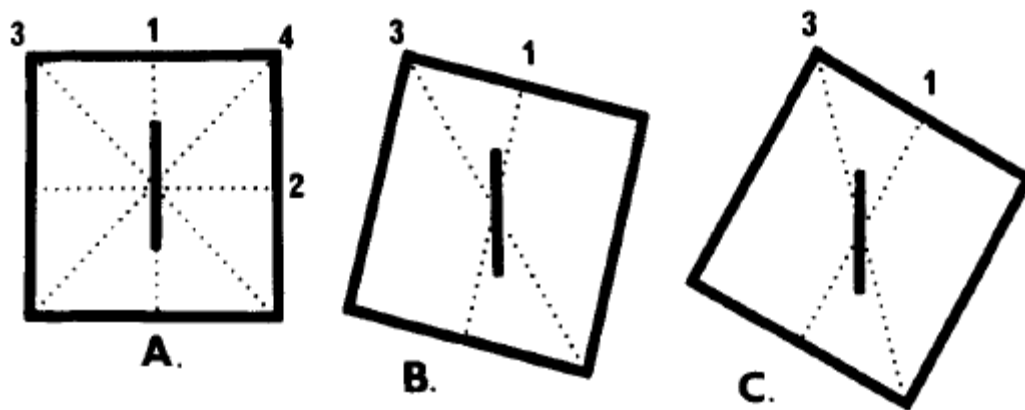


Figure 1.6. Illustration des lignes de référence quand le cadre est carré (1 = verticale, 2 = horizontale, 3 et 4 = diagonales) et des lignes les plus proches de la verticale quand le cadre est incliné de 0° (A), de 15° (B) et de 30° (C). D'après Beh *et al.*, 1971, modifié.

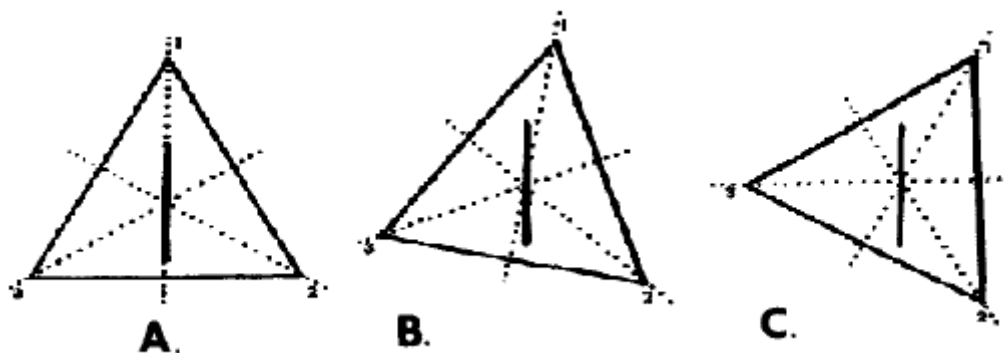


Figure 1.7. Illustration des lignes de référence quand le cadre est un triangle et des lignes les plus proches de la verticale quand le cadre est incliné de 0° (A), de 15° (B) et de 30° (C). D'après Beh *et al.*, 1972, modifié.

Cian *et al.* (2001) ont rapporté des effets comparables avec d'autres contextes qu'un cadre géométrique. Ils utilisent des images d'objets (carte de la France) ou d'animaux (souris, éléphant), comportant en leur centre la barre lumineuse à ajuster avec la verticale gravitaire. Différentes conditions sont comparées dans lesquelles l'axe principal de ces images est incliné dans le sens horaire ou anti-horaire par rapport à leur orientation familière. Ici aussi, les auteurs provoquent un conflit entre les informations visuelles d'une part, et les informations vestibulaires et proprioceptives d'autre part. Les données montrent que les participants inclinent la barre en direction de l'axe principal des objets. Les erreurs sont fortement corrélées avec celles produites au RFT (Figure 1.8). En présence d'informations divergentes, une partie des participants sains semble

davantage influencée par le contexte visuel.

Une seconde possibilité pour tester le rôle des informations visuelles est offerte par la stimulation optocinétique. Il s'agit de la projection d'un environnement visuel en mouvement dans le plan frontal comme celui que permet d'obtenir une boule à facettes. Les mouvements détectés par le système visuel sont en conflit avec les informations somesthésiques et vestibulaires. On observe dans cette condition une déviation de la VVS dans le sens du déplacement visuel (e.g. Guerraz *et al.*, 1998). Les auteurs supposent que les mouvements visuels provoquent une réaction posturale dans le sens inverse qui produirait alors un effet Müller.

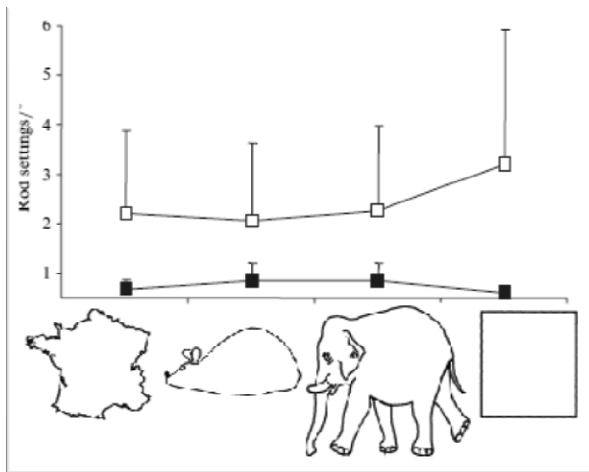


Figure 1.8 : Évaluation de la VVS en présence d'objets présentés dans leur position de référence (en noir) ou inclinés à $\pm 20^\circ$ (en blanc). D'après Cian *et al.*, 2001, modifié.

1.3.3. Effets de perturbations somesthésiques sur la verticale subjective

Il est possible de modifier les informations somesthésiques indépendamment des informations vestibulaires et visuelles en rendant homogènes les pressions cutanées exercées sur l'ensemble du corps et en inclinant le corps complet. Trousselard *et al.*, (2003) ont conçu une coque (dérivée du matelas-coquille utilisé par les services d'urgence, que l'on peut rigidifier par dépressurisation) permettant d'envelopper un individu de la tête aux pieds, à la manière d'un sarcophage et qui entraîne une immobilisation totale ainsi qu'une homogénéisation des pressions sur l'ensemble du corps. Ce système permet donc de diminuer l'asymétrie relative aux informations

somesthésiques due à une inclinaison du corps. La perception de la gravité relative aux informations proprioceptives devrait donc être altérée. Dans leur étude, Trousselard *et al.* (2004) demandent à des participants sains d'aligner une barre avec la verticale gravitaire grâce à une manette. Les participants enveloppés dans la coque ou non, sont placés sur une chaise inclinable en roulis et maintenus avec des sangles. Ils doivent réaliser les ajustements alors qu'ils sont plus ou moins inclinés. Dans ces conditions, la VS est déviée dans le sens de l'inclinaison du sujet (effet Aubert) et la déviation augmente proportionnellement à son inclinaison : ces effets classiques s'expliquent par une sous-estimation de l'inclinaison du corps. Les auteurs observent également que la déviation de la VS est plus importante avec la coque. Dans cette condition, l'augmentation de l'effet Aubert s'expliquerait par une sous estimation de l'orientation du corps plus importante en raison de la diminution de l'asymétrie somesthésique, provoquant ainsi une perte d'informations sensorielles (Trousselard *et al.*, 2004). Par ailleurs, ces mêmes auteurs proposent aux participants de cette étude un lestage gastrique (ingestion de 450 g de pâtes cuites). La déviation de la VS s'avère moins importante dans cette condition, que les participants soient dans la "coque" ou non, ce qui suggère que le lestage gastrique apporte des informations gravitaires et permet une meilleure estimation de l'orientation (Trousselard *et al.*, 2004). La perception de la verticale intègre donc des informations somesthésiques variées concernant les récepteurs cutanés mais également les intérocepteurs.

En conclusion, la modification des informations vestibulaires, visuelles ou somesthésiques provoque généralement une déviation de la verticale subjective, fonction de l'asymétrie de la stimulation, du conflit sensoriel ou de la sensibilité des participants évalués. Cependant, la stimulation d'un système sensoriel peut entraîner une modification des autres systèmes comme par exemple la torsion oculaire lors de la stimulation vestibulaire. Dans les études rapportées ci-dessus une asymétrie temporaire des systèmes sensoriels est provoquée. La section suivante est consacrée aux effets de déficits permanents des systèmes sensoriels sur la perception de la verticale.

1.4. Données de la littérature concernant les patients porteurs de lésions périphériques

1.4.1. Effets des lésions du système vestibulaire sur la verticale subjective

Dans le cadre des atteintes vestibulaires périphériques, Clark et Graybiel (1963) ont montré que les patients présentant des lésions bilatérales ajustent la barre lumineuse aussi bien que des participants sains, placés dans des conditions optimales, c'est-à-dire tête et corps alignés. Ces auteurs rapportent une estimation de la VS comprise entre -4° et $+2^{\circ}$. En cas d'atteinte unilatérale, les patients inclinent la barre lumineuse du côté de la lésion (Figure 1.10 : Bisdorff *et al.*, 1996). Les données montrent qu'une lésion vestibulaire unilatérale provoque une déviation importante de la VVS une semaine après l'opération. Cependant, la perception de la verticale posturale est correcte, ce qui suggère un rôle prépondérant de la somesthésie dans l'estimation de cette verticale.

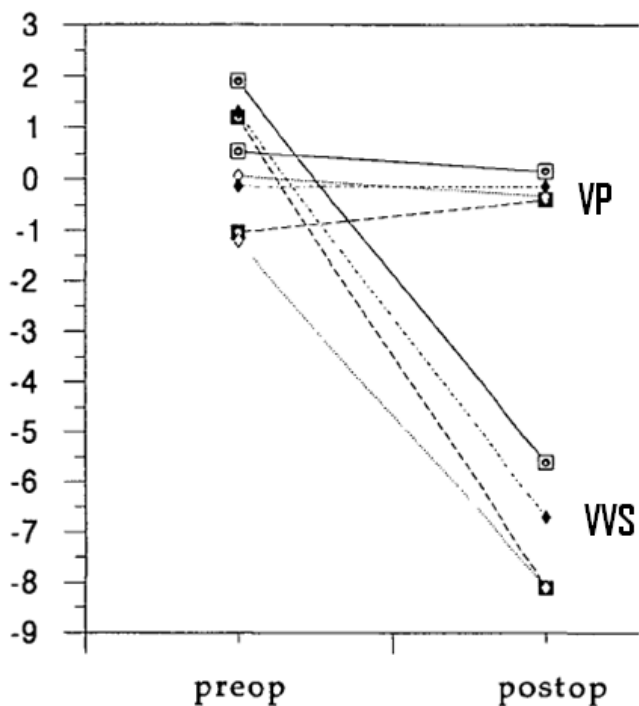


Figure 1.10 : VVS et VP avant et après une vestibulectomie unilatérale (d'après Bisdorff *et al.*, 1996).

1.4.2. Effets des lésions du système visuel sur la verticale subjective

Gentaz et Hatwell (1998) évaluent la perception de la verticale, de l'horizontale et de l'oblique chez des participants aveugles de naissance et devenus aveugles plus tardivement. Ils constatent que la verticale haptique subjective des participants aveugles n'est pas significativement différente de la verticale gravitaire. La perception de la verticale n'est donc pas altérée par l'absence complète d'information visuelle, même quand les participants ont expérimenté la vision pendant une durée d'en moyenne 16 ans. Rondot *et al.* (1992) montrent que la posture est influencée par une atteinte asymétrique du système visuel. Leurs patients présentent une hémianopsie droite ou gauche après une atteinte cérébrale plus ou moins récente et montrent une déviation du centre de gravité vers l'hémichamp visuel altéré. De la même manière, des participants sains portant un masque cachant l'hémichamp visuel droit ou gauche montrent une déviation du centre de gravité vers l'hémichamp caché. Les auteurs supposent que l'hémichamp visuel préservé exerce un effet sur la posture en déplaçant l'axe corporel vers l'hémichamp visuel altéré. Cet effet pourrait constituer une stratégie adaptative pour compenser la perte de la symétrie visuelle. En ce qui concerne la perception des orientations, le droit devant subjectif est dévié vers l'hémichamp visuel sain, c'est-à-dire vers la droite pour des patients cérébro-lésés droits (Saj *et al.*, 2010) et la verticale subjective est déviée dans le sens anti-horaire chez ces mêmes patients (Saj *et al.*, 2012a). Par ailleurs, la verticale subjective est davantage déviée quand la barre à ajuster se trouve dans l'hémichamp altéré, c'est-à-dire à gauche pour les patients cérébro-lésés droits (Saj *et al.*, 2012a). Les conditions expérimentales imposées peuvent limiter l'exploration visuelle vers la gauche car la tête est sanglée et alignée avec le corps. Dans cette position, la perception du stimulus lumineux pouvait être diminuée dans l'hémichamp gauche, altérant les performances des patients qui présentent une hémianopsie. Les effets de la posture mis en évidence par Rondot *et al.* (1992) et l'importance du cortex visuel dans la construction de la représentation de l'espace semblent également avoir un rôle dans les déviations observées chez les patients qui présentent une hémianopsie gauche.

1.4.3. Effets des lésions du système somesthésique sur la verticale

subjective

Chez trois patients souffrant d'une perte totale de la sensibilité à partir du cou, la VVS était comparable à celle d'un groupe de participants sains. Les performances des participants sains étaient de $0,1^\circ \pm 1,0^\circ$ alors que les trois patients avaient une VVS à $1,1^\circ \pm 1,0^\circ$, $-0,5^\circ \pm 0,8^\circ$ et $1,5^\circ \pm 1,3^\circ$. De plus, le secteur d'incertitude est de $0,3^\circ \pm 1,0^\circ$ chez les participants sains, et de $1,0^\circ \pm 0,5^\circ$, $1,5^\circ \pm 0,5^\circ$ et $1,5 \pm 0,6^\circ$ chez les patients (Mazibrada *et al.*, 2008). Chez un autre patient dont la sensibilité générale est affectée à la suite d'une démyélinisation d'origine virale, Yardley (1990) montre que la VVS n'est pas significativement différente de celle des participants sains. Ce patient obtient une moyenne de $-1,0^\circ$ avec un écart-type de $1,4^\circ$ en position normale. Cependant, en position inclinée en roulis à 90° , il incline la barre dans le sens inverse de l'inclinaison de son corps (effet Müller) alors que tous les participants normaux montrent un effet Aubert. Une mauvaise estimation de l'orientation du corps résultant de l'absence de système somesthésique semble être la cause de cet effet.

Une autre étude de Day et Cole (2002) chez un patient déafférenté (IW) montre l'importance de la somesthésie dans le contrôle postural. Dans cette étude, les auteurs provoquent une modification de la posture chez IW au moyen de stimulations galvaniques. En l'absence de contrôle visuel, la déviation posturale est beaucoup plus importante chez IW (de $3,4^\circ$ à $8,5^\circ$ selon l'intensité de la stimulation) que chez le participant témoin (de $0,2^\circ$ à $0,4^\circ$). En présence d'informations visuelles, IW réajuste sa posture ($2,8^\circ$) mais pas assez pour revenir à la normale ($0,4^\circ$ chez le sujet sain). L'interprétation de Day et Cole (2002) est que l'absence de somesthésie empêche de compenser la modification posturale induite.

En conclusion, l'altération d'un système parmi les systèmes vestibulaire, visuel et somesthésique peut être compensée par les systèmes préservés et va dans le sens de l'intégration multisensorielle. Même si les patients évalués présentent initialement une déviation de leur verticale subjective, les performances tendent à se normaliser après un délai plus ou moins long. La représentation de l'espace au moyen de plusieurs systèmes sensoriels (redondance) et l'intégration de ces informations sensorielles au niveau du système nerveux central sont des aspects adaptatifs qui permettent de compenser la perte d'un des systèmes. La section suivante décrit les conséquences d'une lésion du système nerveux central sur la perception visuo-spatiale.

1.5. Données de la littérature concernant les patients cérébro-lésés

L'étude des patients cérébro-lésés a confirmé l'importance de l'intégrité cérébrale pour la perception de la verticale et permis de préciser les régions anatomiques concourant à son élaboration. En particulier, l'étude des patients cérébro-lésés droits contribue depuis plusieurs décennies à améliorer notre compréhension des mécanismes impliqués dans la perception de l'espace. Cette section décrit le cas particulier de la négligence spatiale gauche, ses déficits cliniques, ses conséquences sur la perception de l'espace et les effets de stimulations sensorielles sur la perception de la verticale.

1.5.1. Un exemple de désorientation spatiale : la négligence spatiale

La négligence spatiale est un trouble neurologique, généralement observé après une lésion cérébrale. Elle est définie comme « l'incapacité à rendre compte de, de répondre à et de s'orienter vers des stimulations nouvelles ou significatives dans l'hémiespace contralésionnel, sans que ce déficit puisse être attribué à un trouble sensoriel ou moteur » (Heilman, 1979). Les déficits

concernent les espaces personnel, péripersonnel et extracorporel. La cause la plus fréquente est l'infarctus de l'artère cérébrale moyenne (Vallar, 1993). Elle est plus souvent observée après une lésion de l'hémisphère droit qu'après une lésion de l'hémisphère gauche (Bowen *et al.*, 1999). Par ailleurs, la négligence semble plus sévère et plus durable après lésion hémisphérique droite qu'en cas d'atteinte de l'hémisphère gauche (Viader et De La Sayette, 1992).

1.5.2. Déficits

Sur le plan clinique, les déficits concernent en premier lieu l'exploration visuelle de l'espace contralésionnel. Cependant, les modalités auditive et tactile peuvent également être concernées. Ils donnent également l'impression qu'une partie de l'espace se situant sur leur gauche est inexistante avec une absence de regard et d'interaction dans cette direction. Ce trouble provoque des comportements aberrants dans la vie quotidienne : partie gauche de l'assiette non consommée, partie gauche des vêtements mal ajustée, omission d'une partie du corps lors de la toilette et de la partie gauche du visage lors du rasage ou du maquillage, des difficultés pour se déplacer avec notamment des accrochages à gauche dans les couloirs ou lors d'un passage de porte... Par ailleurs, une négligence motrice est souvent observée avec une sous-utilisation du membre supérieur gauche ou encore une difficulté d'exploration de l'espace gauche avec le membre supérieur droit (hypokinésie directionnelle). Les patients peuvent également présenter une déviation de la tête, des yeux et du tronc du côté de la lésion. D'autres troubles cliniques peuvent être associés, tels qu'une hémiplégie, une amputation contralésionnelle du champ visuel (hémianopsie), un défaut de détection d'un stimulus présenté du côté contralésionnel lorsqu'un stimulus ipsilésionnel est présenté simultanément (extinction spatiale), une absence de conscience des troubles (anosognosie), un report des éléments de gauche vers la partie droite (allochirie).

La négligence touche également les représentations internes. Par exemple, une omission des éléments se situant à gauche est observée dans les tâches de description de mémoire d'un lieu connu (Bisiach *et al.*, 1979). Cette omission n'est pas le reflet d'un trouble de la mémoire car les omissions se font en fonction de l'endroit où le patient s'imagine situé. Cependant, les omissions semblent beaucoup moins fréquentes lorsque le patient se représente la scène derrière lui (Viaud-Delmon *et al.*, 2007, Saj et Vuilleumier., 2007). Les références égocentrées et allocentrées sont également perturbées chez les patients négligents, avec une déviation du droit devant subjectif vers la droite (Richard *et al.*, 2004 ; Saj *et al.*, 2006a ; Saj *et al.*, 2008 ; Saj *et al.*, 2010 ; Saj *et al.*, 2012b) et une déviation antihoraire de la verticale subjective (Kerkhoff, 1999 ; Saj *et al.*, 2005a ; Saj *et al.*, 2005c ; Saj *et al.*, 2006b). Par ailleurs, la déviation antihoraire est plus importante dans l'espace négligé (Saj *et al.*, 2005b, Saj *et al.*, 2012a).

L'évaluation cognitive de la négligence est souvent réalisée avec la batterie d'évaluation de la négligence (BEN) proposée par Rousseaux *et al.* (2001). Elle explore par exemple l'anosognosie, la déviation tête, yeux, tronc, l'hypokinésie directionnelle, l'extinction visuelle, auditive et tactile, la négligence visuo-motrice avec le test des cloches (Gauthier *et al.*, 1989), le test de copie de dessin (Ogden, 1985), la négligence visuelle avec les figures enchevêtrées, et la présence de répercussions dans la vie de tous les jours. D'autres tests comme le Schenkenberg (1980) évalue la bissection de lignes, le fluff-test (Cocchini *et al.*, 2001) qui évalue la négligence corporelle.

En conclusion, la négligence spatiale est un déficit fréquent après une lésion cérébrale droite qui conduit à un tableau clinique complexe, caractérisé par une omission d'une partie de l'espace gauche perçu et représenté. Les références spatiales allocentrée et égocentrée sont également perturbées, comme cela est observé dans les tâches de verticale subjective et de droit devant subjectif.

1.5.3. Conséquences sur la verticale subjective

L'examen de patients cérébro-lésés a permis de distinguer des déficits différents en fonction du côté de la lésion. De Renzi *et al.* (1971) ont évalué 121 patients cérébro-lésés droits ou gauches, avec ou sans troubles visuo-spatiaux, dans une tâche de reproduction d'orientations horizontale et verticale, dans les modalités visuelle et haptique. Ils montrent que les patients cérébro-lésés droits avec troubles visuo-spatiaux présentent une déviation significativement plus importante que les autres patients et que les patients non cérébro-lésés contrôles dans les deux modalités. Cependant, les atteintes cérébrales ne sont pas détaillées dans leur méthode.

Brandt *et al.*, (1994) ont quant à eux évalué 71 patients victimes d'un accident vasculaire cérébral (AVC) touchant les artères cérébrales antérieure, moyenne ou postérieure, droite ou gauche. La VVS de 18 patients, parmi les 52 présentant une atteinte de l'artère cérébrale moyenne, était déviée dans le sens contralésionnel. Onze d'entre eux avaient une lésion droite et 7 avaient une lésion gauche. Les lésions dues à une atteinte des artères cérébrales antérieure ou postérieure n'occasionnaient pas de déviation de la VVS. Brandt *et al.* concluent que les lésions du cortex pariétal postérieur provoquent une perturbation de l'intégration multisensorielle, responsable de la déviation de la VS. Cependant, ces auteurs n'ont pas évalué les signes de négligence.

En 1999, Kerkhoff rappelle qu'il est admis que les patients souffrant de négligence spatiale présentent des troubles visuo-spatiaux essentiellement dans le plan horizontal, mais que peu d'études ont recherché d'éventuels déficits dans les plans verticaux. Partant de ce constat, il compare 11 patients cérébro-lésés droits avec négligence (N+), 12 patients cérébro-lésés droits sans négligence (N-), 11 patients cérébro-lésés gauches et 22 participants sains. Le but était de comparer leurs performances dans les modalités visuelles et haptique et de vérifier si la sévérité de la négligence était corrélée à l'amplitude des déviations dans une tâche de perception de la verticale, de l'horizontale et de l'oblique (45°). Les données indiquent que les patients N+ ont une déviation

anti-horaire des trois orientations testées dans la modalité visuelle (entre $-9,5^\circ$ et $-5,6^\circ$) et dans la modalité haptique (entre $-10,5^\circ$ et $-5,2^\circ$) alors que les patients et les participants contrôles ont une déviation inférieure à 1° . Par ailleurs, la sévérité de la négligence évaluée par 6 tests cliniques s'avère positivement corrélée avec les déviations. Yelnik *et al.* (2002) évaluent 40 patients cérébro-lésés et montrent également que la déviation de la verticale est associée à la présence d'une négligence spatiale, même dans le cas d'une négligence spatiale droite après lésion gauche.

En conclusion, une lésion cérébrale, surtout si elle concerne le territoire irrigué par l'artère cérébrale moyenne droite, peut entraîner une déviation de la verticale subjective. Par ailleurs, la présence d'une négligence spatiale aggrave les déviations. Cette conclusion résulte de travaux réalisés dans des conditions naturelles, c'est-à-dire avec la tête et le corps les plus droits possible. La section suivante traite des effets d'une modulation des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques chez les mêmes patients.

1.5.3.1. Effets des informations vestibulaires sur la verticale subjective

L'application de stimulations galvaniques chez les patients négligents entraîne des déviations de la VS correspondant à celles obtenues chez les participants sains. En particulier, les stimulations galvaniques provoquent une aggravation de la déviation de la VS quand l'anode est située à gauche et une amélioration de la VS quand l'anode est située à droite (Figure 1.11, Saj *et al.*, 2006b). Ces données sont compatibles avec l'idée que la déviation de la VS chez les patients négligents est en partie causée par une asymétrie des informations vestibulaires.

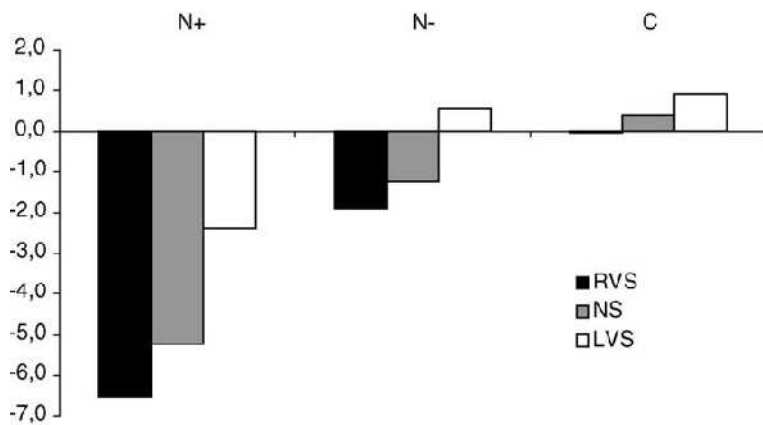


Figure 1.11 : Déviation de la verticale subjective chez des patients avec (N+) et sans négligence (N-) et chez des contrôles sains (C). Conditions : sans stimulation galvanique (NS), avec stimulation droite (RVS) ou gauche (LVS). D'après Saj *et al.*, 2006b.

A partir des données concernant une possible diminution de la sensibilité du système vestibulaire en position allongée (cf. section 1.4.1), Pizzamiglio *et al.* (1997) ont proposé un modèle susceptible d'expliquer l'amélioration des performances dans une tâche de bissection de ligne que les patients négligents présentent dans cette position. Selon ces auteurs, les déficits observés chez ces patients seraient provoqués par une déviation de la représentation de l'axe sagittal de leur corps du côté lésé, déviation causée par un déséquilibre résultant d'une diminution des informations visuelles, vestibulaires et somesthésiques issues du côté contralésionnel. La diminution du poids du système vestibulaire en position allongée entraînerait une diminution du déséquilibre et donc une amélioration de la représentation de l'axe sagittal (figure 1.12).

Saj *et al.* (2005c) ont également observé l'amélioration de déficits chez les patients négligents en position allongée. Leurs données montrent une diminution de l'erreur anti-horaire quand les patients passent de la position assise à la position allongée (figure 1.13). Néanmoins, l'amélioration des performances dans les conditions jambes allongées et sans support suggère la participation d'un déséquilibre somesthésique dans les perturbations de la perception de la verticale chez les patients négligents (voir plus loin).

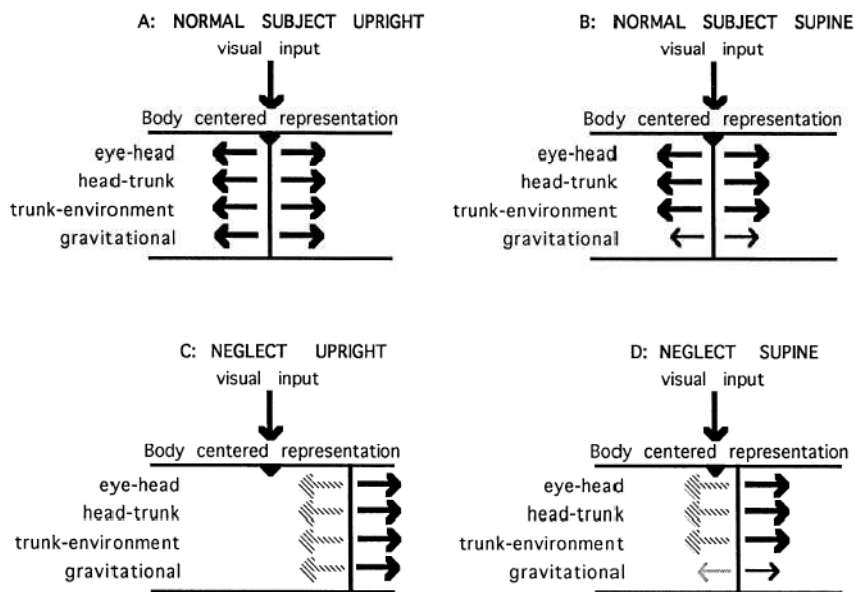


Figure 1.12 : Illustration de la déviation du DDS chez les participants sains (NORMAL) et les patients négligents (NEGLECT) en fonction de la posture (d'après Pizzamiglio *et al.*, 1997).

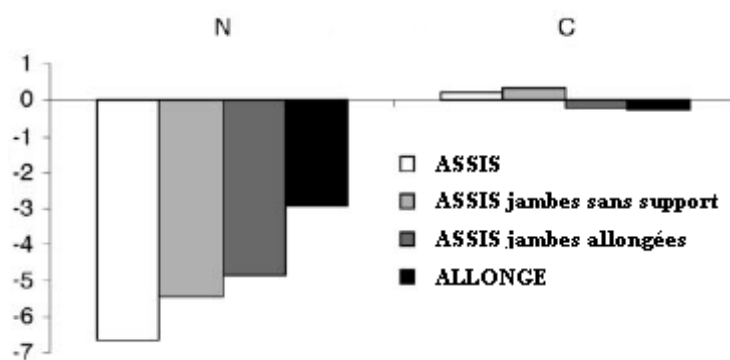


Figure 1.13 : Évolution de la déviation de la VVHS chez des patients négligents en comparaison avec des participants sains dans différentes postures (d'après Saj *et al.*, 2005c, modifié).

1.5.3.2. Effets des informations visuelles sur la verticale subjective

Une étude réalisée avec le RFT montre que les patients cérébro-lésés présentant une hémiplégie seraient davantage dépendants à l'égard du champ (56%) que des participants contrôles (26%). Bonan *et al.* (2006a) en déduisent que les patients cérébro-lésés présentent une confiance exagérée envers le contexte visuel. Ils proposent différentes hypothèses pouvant expliquer cette dépendance visuelle excessive : comportement adaptatif privilégiant les informations visuelles au détriment des informations vestibulaires et proprioceptives perturbées ou stratégie compensatoire non spécifique aux patients cérébro-lésés pour faire face à un équilibre déficitaire.

De plus, la localisation spatiale de la barre à ajuster a une influence sur la verticale subjective des patients négligents : leurs performances sont davantage déficitaires quand la barre est placée dans l'hémi-espace gauche, c'est-à-dire l'espace « négligé » (Saj *et al.*, 2005b, Figure 1.14). En revanche, la localisation spatiale de la barre n'entraîne pas de différence d'ajustement pour les patients lésés sans négligence ou les participants sains. Ces résultats suggèrent que la perception de l'espace est anisométrique chez les patients négligents, avec une compression de l'espace droit et une expansion de l'espace gauche. Par ailleurs, cette anisométrie respecterait une progression logarithmique comme le suggèrent les données obtenues lors de la bissection de lignes illusoirement rallongées (illusion d'Oppel-Kundt, Savazzi *et al.*, 2007).

Enfin, la présence d'une hémianopsie chez les patients cérébro-lésés droits aggrave la déviation de la VVHS (Saj *et al.*, 2012a). La déviation est plus importante chez les patients négligents et chez les patients hémianopsiques, avec un effet cumulatif de ces deux troubles. L'augmentation de cette déviation pourrait être causée par les modifications posturales liées à la présence d'une hémianopsie (Rondot *et al.*, 1992) ou par la difficulté de détection des stimuli visuels dans l'hémichamp gauche causée par la procédure expérimentale (tête sanglée et alignée avec le corps, Saj *et al.*, 2012a).

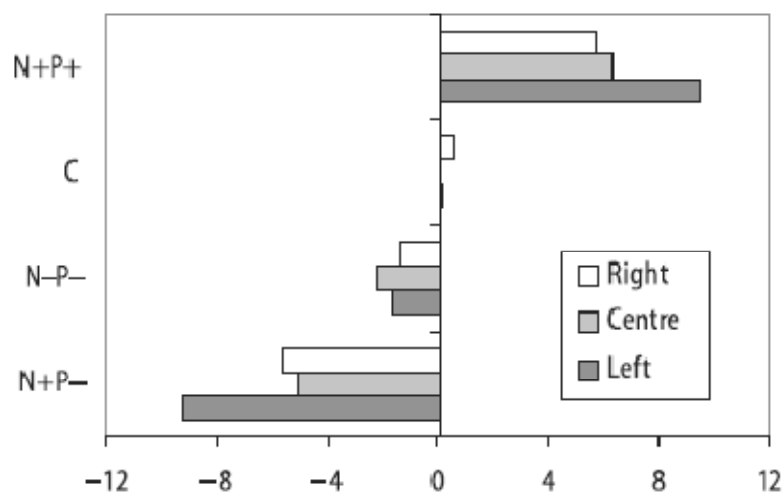


Figure 1.14 : VVHS en fonction du groupe et de la position de la barre (d'après Saj *et al.*, 2005b)

1.5.3.3. Effets des informations somesthésiques sur la verticale subjective

Dans une étude récente, des patients avec des lésions de l'hémisphère droit présentant une négligence doivent ajuster une barre lumineuse avec la verticale gravitaire dans différentes postures. Les participants sont assis avec un support pour les pieds, assis sans support pour les pieds, assis les jambes allongées ou allongés sur le dos (Saj *et al.*, 2005c). Les données suggèrent une déviation plus faible de la VS si les patients sont assis sans support pour les pieds ou ont les jambes allongées, que s'ils ont un support pour les pieds. La diminution des asymétries sensorielles, au niveau des informations plantaires en particulier et des informations proprioceptives en général, permettraient une amélioration de la VS chez les patients négligents (Figure 1.11).

En conclusion, les systèmes vestibulaire, visuel et proprioceptif ont un rôle important dans la perception de la verticale car les déviations des verticales subjectives des patients cérébro-lésés peuvent être modulées par des manipulations des informations traitées par ces systèmes. Le passage à la position allongée ainsi que les stimulations galvaniques peuvent améliorer les performances des patients en diminuant l'asymétrie sensorielle provoquée par la lésion et responsable de la désorientation spatiale. La section qui suit présente les lésions cérébrales corrélées avec les perturbations de la verticale subjective.

1.5.4. Corrélats anatomiques de la perturbation de la verticale subjective

Les lésions cérébrales provoquées par un infarctus de l'artère cérébrale moyenne sont, comme nous l'avons exposé, connues pour entraîner chez les patients une désorientation spatiale avec en particulier une perturbation de la perception de la verticale (Brandt *et al.*, 1994). Chez des patients cérébro-lésés droits et gauches, une analyse quantitative de type voxel-lesion behavior

mapping (VLBM) a été réalisée en prenant les déviations de la VVS comme variable continue (Baier *et al.*, 2012). Chez les 22 patients cérébro-lésés gauches, 12 avaient une déviation horaire de la VVS (de 0,13° à 7,10°) et 9 avaient une déviation anti-horaire (de 0,01° à 7,50°). Parmi les 32 patients cérébro-lésés droits, 20 avaient une déviation anti-horaire de la VVS (de 0,08° à 6,40°), 11 avaient une déviation horaire (de 0,19° à 8,70°). Dans chacun des groupes de patients cérébro-lésés, un patient avait une VVS qui ne différait pas de la verticale gravitaire. L'analyse VLBM montre pour les patients cérébro-lésés gauches, des lésions du cortex insulaire, de l'opercule rolandique et du gyrus frontal inférieur associées à une déviation de la VVS. Pour les patients cérébro-lésés droits, des lésions du cortex insulaire, du gyrus frontal inférieur et du gyrus temporal supérieur sont associés à une déviation de la VVS. Les faisceaux inférieurs occipitaux-frontaux et le faisceau longitudinal supérieur étaient affectés dans les deux groupes.

Une autre étude a été conduite uniquement chez des patients cérébro-lésés droits qui présentaient une déviation anti-horaire de la verticale subjective dans la modalité visuo-haptique. L'analyse VLBM a été réalisée en contrastant les 10 patients montrant les déviations les plus importantes et les 10 patients montrant les déviations les moins importantes. Les lésions sont essentiellement situées au niveau du lobe pariétal inférieur postérieur, de la partie postérieure du segment horizontal du sillon intra-pariétal, de la partie postérieure du gyrus temporal supérieur, du gyrus temporal moyen et du lobe occipital dorso-latéral. Le lobe pariétal inférieur, le gyrus temporal supérieur et le gyrus occipital moyen sont les régions principalement lésées (Figure 1.15 : Rousseaux *et al.*, 2013). Par ailleurs, les corrélats anatomiques pour la perception de la verticale sont essentiellement associés au gyrus pariétal supérieur, au gyrus temporal supérieur et au gyrus temporal moyen (Figure 1.16 : Rousseaux *et al.*, 2013).

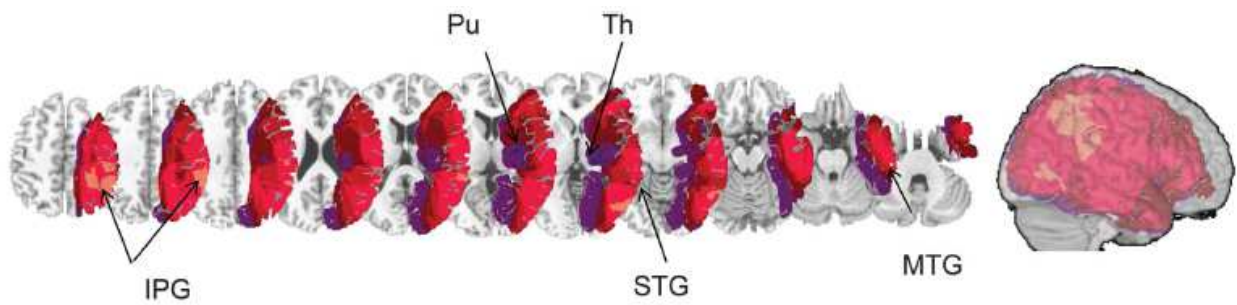


Figure 1.15 : Différences positives (en rouge) et négative (en bleue) entre les dix patients ayant les plus grandes déviations horaire de la VVHS et les dix patients ayant les déviations les plus petites (IPG = gyrus pariétal inférieur ; STG = gyrus temporal supérieur ; MTG = gyrus temporal moyen ; Pu = putamen ; Th = thalamus ; d'après Rousseaux *et al.*, 2013).



Figure 1.16 : Corrélat anatomique de la perception de la verticale (SPG = gyrus pariétal supérieur ; STG = gyrus temporal supérieur ; MTG = gyrus temporal moyen ; d'après Rousseaux *et al.*, 2013).

En conclusion, cette description des lésions cérébrales associées à une inclinaison anti-horaire de la verticale subjective suggère que l'élaboration de cette représentation se construit grâce à un large réseau cortical. La VS est multisensorielle car différents systèmes sensoriels sont impliqués dans son élaboration mais également car l'ensemble de ces informations semblent converger au niveau des noyaux du thalamus et du cortex pariéto-temporal droit afin d'obtenir une estimation unique. La question de l'intégration de ces informations ainsi que du modèle qui la sous-tend reste posée. Dans la section suivante, nous présentons un modèle mathématique bayésien basé sur le maximum de vraisemblance. Ce modèle a déjà été appliqué à l'étude multisensorielle de la perception de la taille ou de la forme des objets. Nous évoquerons d'abord les études pionnières sur la perception multisensorielle avant de développer le modèle.

2. Intégration des informations sensorielles

2.1. Cadre théorique

Nous avons décrit dans la partie précédente un certain nombre de situations expérimentales modifiant un type d'informations sensorielles et ayant pour conséquence d'altérer la perception de la verticale. Ainsi, la présence d'un cadre visuel, des stimulations vestibulaires ou un changement postural peuvent provoquer une modification de la verticale subjective chez les participants sains et chez les patients. Dans ces conditions, qui diffèrent de la condition optimale où le participant est droit, dans un environnement « normal » et sans stimulation sensorielle asymétrique, les différents systèmes sensoriels apportent des informations qui entrent en conflit, car ils donnent vraisemblablement des informations différentes sur l'environnement, les déplacements et la position du corps dans l'espace. Cependant, le système nerveux central qui reçoit ces informations doit prendre la décision la plus adaptée pour les traiter de manière efficace.

En effet, que se passe-t-il lors d'un conflit sensoriel provoqué par la perturbation d'une information sensorielle : le système nerveux central ne prend-il en considération qu'une seule information sensorielle sans prendre les autres en considération ? Dans cette hypothèse, comment le système nerveux central décide-t-il quelle information est la plus précise ? Ou bien prend-il en considération l'ensemble des informations sensorielles disponibles ? Mais dans ce cas, comment détermine-t-il la ou les informations biaisées pour donner plus d'importance aux informations sensorielles non perturbées. La notion d'intégration multisensorielle est la plus utilisée pour décrire ce qui se passe au niveau cérébral, pour rendre compte des phénomènes de conflits sensoriels qui seront traités dans la section qui suit.

2.2. Etudes pionnières

Les études pionnières sur l'intégration multisensorielle ont porté sur l'intégration des informations visuelles et haptiques lors de tâche d'estimation de la taille d'un objet. Rock et Victor (1964) proposent à des participants sains d'estimer la taille d'un objet lors d'une exploration visuelle et haptique. Pendant l'estimation, les participants perçoivent l'objet au travers d'une lentille qui modifie la taille de l'objet. Le résultat de ce conflit perceptif est que les participants donnent systématiquement une réponse basée sur l'information visuelle, c'est-à-dire que les participants ne semblent pas (ou peu) prendre en compte les informations haptiques. Ce phénomène est connu sous le nom de « capture visuelle ».

Cette dominance visuelle est remise en question quand les informations visuelles sont dégradées. Heller (1983) demande à des participants sains d'identifier un objet en utilisant les informations visuelles et haptiques. L'objet à identifier se trouve au fond d'une boîte et, alors que les informations haptiques sont inchangées, les informations visuelles sont dégradées. En effet, les participants regardent au travers d'un verre irrégulier qui rend les contours et limites plus difficilement distinguable. L'information visuelle est donc bruitée pour réduire sa précision. Dans cette situation, les informations haptiques deviennent plus précises que les visuelles : on constate alors une dominance haptique (Heller, 1983). Ainsi, selon le contexte de la tâche, la modalité sensorielle offrant la meilleure précision deviendrait dominante (Welch et Warren, 1986).

Cette dominance flexible indique que le système nerveux central est capable de modifier ses décisions en fonction de la précision actuelle des systèmes sensoriels et suggère qu'il prend en considération de l'ensemble des informations disponibles et qu'il dispose de connaissances sur leur précision à un moment donné et dans une situation donnée. Si une information est imprécise, le système nerveux central privilégie une autre information disponible. Si les informations disponibles ont des précisions proches, il les utilise en donnant à chacune un poids proportionnel à sa précision.

Le système nerveux central utiliserait une pondération basée sur ses connaissances antérieures quant à la précision de chaque système sensoriel, mais il serait capable, lorsqu'un d'eux se dégrade, d'en réduire l'importance au profit d'un autre devenu relativement plus précis. Le modèle d'Ernst et Banks (2002), basé sur les notions qui viennent d'être abordées, est développé dans la section suivante.

2.3. Modèle d'intégration multisensorielle

Le modèle d'intégration, qui est décrit dans cette partie, s'inscrit dans la théorie de détection du signal proposée par Green et Swets (1988). Ces auteurs proposent que la perception est un processus probabiliste car elle est systématiquement associée à une variabilité. Sur le plan psychométrique, les auteurs font d'ailleurs souvent la différence entre l'erreur constante, qui correspond à la moyenne des estimations et l'erreur variable, qui correspond à l'écart-type ou à la dispersion des estimations autour de la moyenne. Dans le cas « simple » de l'estimation de la taille d'un objet au moyen d'informations visuelles, les auteurs du modèle d'intégration postulent que cette estimation suit une loi normale caractérisée par une erreur constante et une erreur variable (figure 1.17) : cette courbe est généralement modélisée dans le cadre de la comparaison d'un stimulus avec un étalon avec en abscisse la taille du stimulus et en ordonnée la probabilité de répondre qu'il est plus grand (par exemple) que l'étalon. Ils définissent également la notion de précision, correspondant à l'inverse de l'erreur variable au carré.

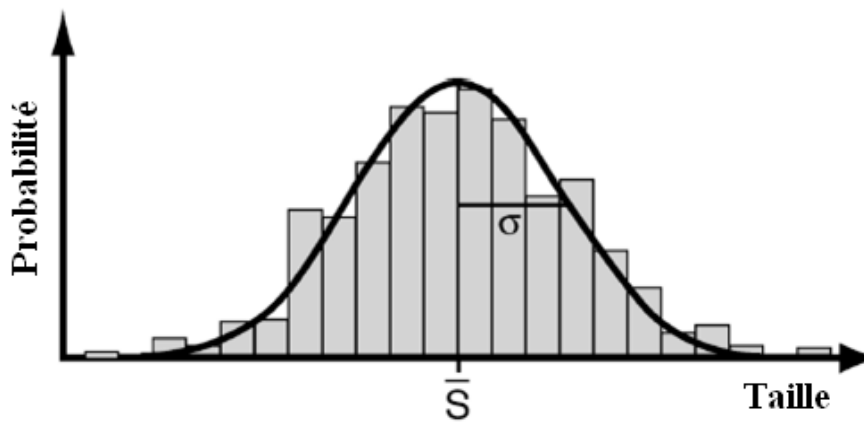


Figure 1.17 : Représentation de la perception de la taille d'un objet caractérisée par une erreur constante (\bar{S}) et une erreur variable (σ ; d'après Ernst, 2006, modifié).

Dans le cas plus complexe d'une redondance des informations sensorielles, par exemple lors de l'estimation de la taille d'un objet au moyen d'informations visuelles et haptiques, les résultats pourraient être schématisés par une loi normale résultant de la combinaison de deux lois normales. Ces deux lois normales ont *a priori* des erreurs constantes proches (car évaluant la même propriété), mais des erreurs variables potentiellement différentes en raison de la sensibilité du système sensoriel. Statistiquement, la loi normale qui en résulte est caractérisée par une erreur constante proche de celles des deux systèmes sensorielles pris isolément, mais par une erreur variable plus faible que celles de chacun des deux systèmes (car la combinaison de deux erreurs variables donne une erreur variable plus petite mathématiquement : Figure 1.18).

Cette conception probabiliste de la perception met donc en avant deux avantages que le système nerveux central peut tirer de l'intégration de différentes informations sensorielles. Le premier intérêt est la possibilité de remplacer un système par un autre en cas d'altération d'un système. Le second intérêt est la plus grande fiabilité des estimations multisensorielles.

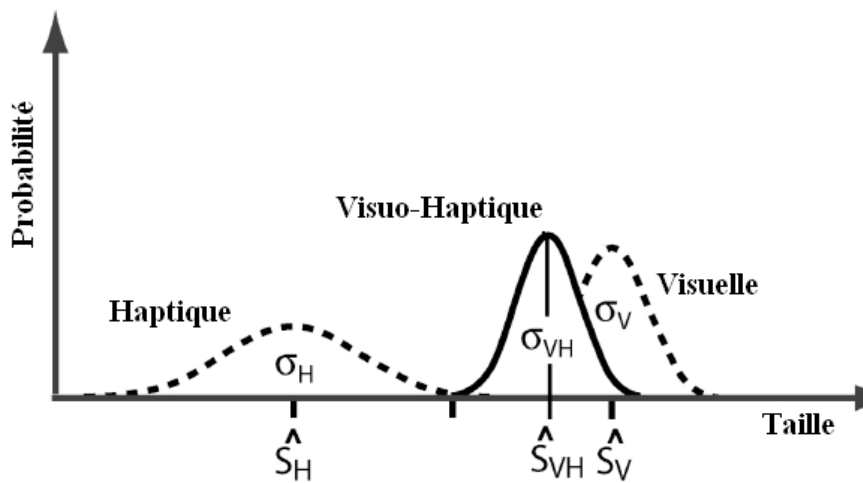


Figure 1.18 : Simulation de la perception de la taille d'un objet dans la modalité visuo-haptique résultant de la combinaison des estimations visuelles et haptiques (adapté d'Ernst, 2006).

Ernst et Banks (2002) ont testé leur modèle dans le cas de l'intégration visuo-haptique dans une tâche d'estimation de la taille d'un objet. Dans cette étude, les participants peuvent voir, par le biais de lunettes stéréotaxiques, un objet projeté sur un miroir. Dans l'axe du regard, l'objet est simulé par un appareil à retour de force haptique (Figure 1.19). Pendant l'expérience, les auteurs modifient les informations visuelles en les rendant plus ou moins précises ; les informations haptiques restent quant à elles inchangées. Les données sont en faveur d'une capture visuelle quand les informations visuelles sont précises. Plus elles sont dégradées, moins l'estimation de la taille est basée sur les informations visuelles et on observe une capture haptique quand les informations visuelles sont bruitées au maximum. Ernst et Banks (2002) montrent qu'un modèle bayésien de maximum de vraisemblance permet de rendre compte des résultats observés lors de telles situations.

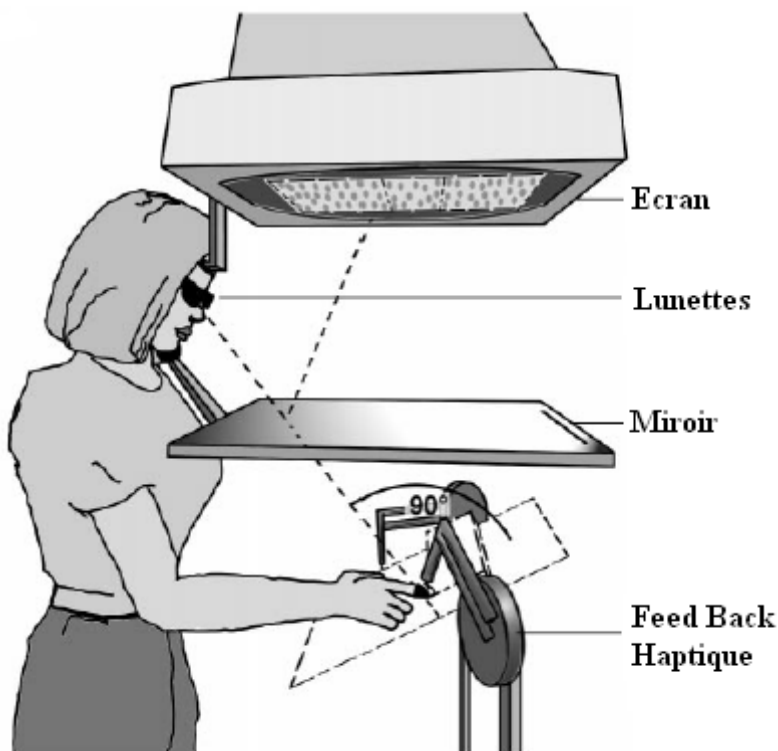


Figure 1.19 : Procédé expérimental permettant l'évaluation de la perception de la taille d'un objet en présence d'un conflit sensoriel (d'après Ernst et Banks, 2002, modifié).

Ce modèle suppose que le mécanisme d'intégration visuo-haptique utilise une mesure de la variabilité de chaque modalité prise isolément afin de déterminer la pondération avec laquelle celle-ci doit être intégrée lorsque l'estimation de la même propriété est réalisée par les deux modalités simultanément. Si les prédictions du modèle et les valeurs observées en condition bimodale sont proches, alors le système cognitif intègre les deux modalités en donnant plus d'importance à la modalité la plus précise de manière à approcher un critère d'optimalité basé sur la précision des estimations. Le modèle suggère également que le système neurocognitif est un système optimal dans ce sens qu'il fonctionne comme un estimateur du maximum de vraisemblance et qu'il minimise la variabilité (i.e. augmente la précision) des estimations multimodale (Ernst et Banks, 2002). Outre cette validation chez les participants sains pour une propriété intrinsèque des objets (la taille), d'autres études ont montré que les informations visuelles et auditives étaient également intégrées conformément au modèle bayésien (effet ventriloque, Alais et Burr, 2004). La portée de ce modèle semble donc générale concernant l'intégration des informations sensorielles pour l'estimation des propriétés intrinsèques des objets et chez les participants sains.

Le modèle paraît également adapté au cas de l'intégration des informations sensorielles pour l'estimation de propriétés extrinsèques des objets. En effet, Gori *et al.* (2008) ont évalué la perception de la taille et de l'orientation d'un objet en utilisant une méthode qui diffère sensiblement de celle utilisée par Ernst et Banks (2002). La différence la plus importante réside sûrement dans le fait que les deux stimuli ne sont pas superposés. Dans les deux tâches proposées par Gori *et al.*, les participants voient l'objet et peuvent le toucher derrière le dispositif expérimental (Figure B 1.20). L'objet est présenté dans la modalité visuelle ou dans la modalité haptique et, après un court délai, un nouvel objet est présenté dans la même modalité ou dans l'autre. Les participants doivent comparer les deux objets : le deuxième objet est-il plus petit (dans la tâche de perception de la taille) ou plus incliné (dans la tâche de perception des orientations) ? La tâche est réalisée dans un environnement calme, avec une lumière naturelle. Leur méthode est d'abord validée sur un groupe de 3 participants sains adultes. La modalité visuelle peut être bruitée par la présence d'un écran strié placé plus ou moins près de l'objet à évaluer (Figure A 1.20).

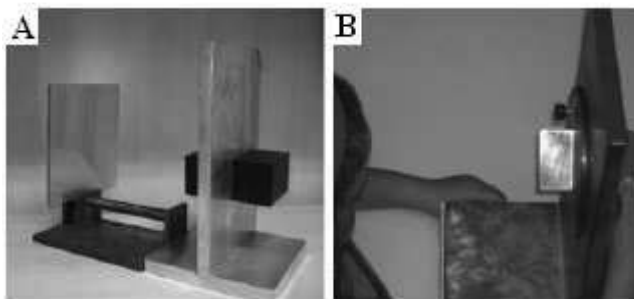


Figure 1.20 : Dispositif expérimental utilisé par Gori *et al.* pour les adultes. A : un écran strié est placé à une distance variable de l'objet. B : illustration de la condition de comparaison bimodale (d'après Gori *et al.* 2008, modifié).

Les résultats sont conformes à ceux prédits par le modèle d'Ernst et Banks (2002) : les participants intègrent les informations visuelles et haptiques de manière à augmenter la précision des estimations visuo-haptiques dans une tâche de perception de la taille ou de l'orientation d'un objet. Ce modèle d'intégration qui était validé pour des propriétés intrinsèques des objets (leur taille, Ernst et Banks, 2002) l'est donc également pour des propriétés extrinsèques (leur orientation, Gori *et al.*, 2008).

Ces différentes études s'accordent pour dire que les estimations sont réalisées par la combinaison et la pondération des différentes informations disponibles dans l'environnement. L'application de ces travaux à l'étude de la verticale subjective pourrait être une piste intéressante pour la compréhension de la représentation de la verticale chez les participants normaux et pathologique.

2.4. Application du modèle bayésien d'intégration multisensorielle à la verticale subjective visuo-haptique

Concrètement, dans nos expériences, lors des ajustements de la barre avec la verticale gravitaire, les participants seront assis, les jambes allongées et dans l'obscurité. Ils devront réaliser une tâche de perception de la verticale qui nécessite l'intégration des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques. Dans la position imposée ces informations sont redondantes. Cette procédure permettra en théorie d'appréhender la précision des modalités visuelle et haptique ainsi que le poids de ces modalités dans les performances visuo-haptique des participants. Il faut garder à l'esprit que le poids de la modalité visuelle ne concerne pas seulement l'apport de la vision mais bien l'ensemble des informations sensorielles disponibles dans cette modalité d'évaluation. Des précisions seront apportées dans la discussion générale. Une moyenne (\bar{X}) et une variance (σ) seront calculées pour chaque modalité (\bar{X}_v et σ_v pour la modalité visuelle, \bar{X}_h et σ_h pour la modalité haptique, et \bar{X}_{vh} et σ_{vh} pour l'association des deux modalités). À partir de ces valeurs, le poids théorique de la modalité visuelle (P_v) et le poids théorique de la modalité haptique (P_h) seront estimés par :

$$P_v = \sigma_h / (\sigma_h + \sigma_v) \text{ et} \tag{1}$$

$$P_h = \sigma_v / (\sigma_v + \sigma_h) \tag{2}$$

La somme des produits des poids théoriques par les valeurs moyennes des deux modalités simples donne une estimation théorique (E_{vh}) de la valeur attendue lors de la combinaison des deux modalités si le modèle est adéquat :

$$E_{vh} = X_v * P_v + X_h * P_h \quad (3)$$

Il est également possible de prédire la variabilité théorique (σ_T) des performances dans la modalité VH à partir des variabilités obtenues dans les modalités V et H isolées :

$$\sigma_T = (\sigma_h * \sigma_v) / (\sigma_h + \sigma_v) \quad (4)$$

Enfin, la comparaison des valeurs observées X_{vh} et des valeurs prédites E_{vh} permet de tester la validité du modèle. En pratique, ces valeurs devraient être corrélées.

3. Objectifs de la thèse

L'objectif de ce travail de thèse est triple : dans un premier temps, les trois modalités utilisées pour la perception de la verticale seront évaluées avec un matériel unique et une procédure la plus proche possible, ce qui est rarement le cas dans la littérature. Le but est d'apporter des éléments de comparaison entre les différentes modalités évaluant la perception de la verticale et de préciser les informations mises en jeu pour la perception de la verticale dans la modalité visuo-haptique.

Dans un second temps, nous tenterons de montrer que le modèle d'intégration multisensorielle basé sur le maximum de vraisemblance (Ernst et Banks, 2002) rend compte des performances obtenues dans ces trois tâches et donc de valider l'idée d'une intégration multisensorielle bayésienne dans la perception de la verticale. Par ailleurs, le modèle sera pour la première fois utilisé avec une méthode en mesure continue plutôt que dichotomique. Enfin, il sera pour la première fois utilisé pour confronter les performances de patients cérébro-lésés aux critères d'optimalité de ce modèle d'intégration basé sur la précision des informations sensorielles.

Dans un troisième temps, nous nous intéresserons à la modalité haptique, la moins précise pour la perception de la verticale. La verticale subjective haptique sera évaluée dans différentes conditions afin d'étudier l'impact des méthodes d'investigation sur les performances mesurées.

Contributions expérimentales

La partie expérimentale de cette thèse a été pensée en trois temps. Dans un premier temps, notre intérêt s'est porté sur la comparaison de trois modalités, visuelle (VVS), haptique (VHS) et visuo-haptique (VVHS), d'évaluation de la verticale subjective, dans une population de patients cérébro-lésés et dans une population de participants sains contrôles. Les conclusions de cette étude suggèrent que les VVS et VVHS sont en moyenne proches l'une de l'autre et diffèrent toutes deux de la VHS. De plus, la variabilité de la VVHS est plus faible que la variabilité des VVS et VHS. Cette dernière donnée suggère que les participants intègrent les informations visuelles et haptiques avec un critère d'optimalité basé sur la précision comme le propose le modèle développé par Ernst et Banks (2002).

Dans le second temps, le modèle d'intégration multisensorielle est appliqué à la perception de la verticale chez des participants sains. Les données montrent qu'ils utilisent préférentiellement les informations visuelles dans la modalité visuo-haptique. Cependant, les informations haptiques sont intégrées dans l'estimation visuo-haptique, même si leur importance est très faible. Après la validation de ce modèle dans la perception de la verticale, le protocole utilisé est modifié pour altérer la précision des informations visuelles. Dans ces conditions, l'importance des informations haptiques est augmentée dans l'estimation visuo-haptique, ce qui confirme l'intégration des informations visuelles et haptiques de manière optimale. Enfin, le modèle est appliqué dans une population de participants plus âgés et de patients cérébro-lésés qui présentent ou pas des troubles visuo-spatiaux. Les résultats montrent que le modèle reste valide chez des participants plus âgés mais également chez les patients cérébro-lésés, suggérant que le siège de l'intégration multisensorielle pourrait ne pas être localisé au niveau cortical, mais plutôt au niveau des noyaux vestibulaires.

Enfin, le troisième temps est consacré à l'étude des verticales subjectives haptique et visuelle et en particulier à l'influence des conditions d'évaluation. Les résultats montrent que la VHS est fortement déviée dans le sens de la main utilisée, dans le sens des conditions initiales et qu'alors

que les participants sains jeunes ont une VHS dévié en moyenne dans le sens horaire, les participants plus âgés ont une déviation anti-horaire. Les résultats montrent également que la VVS n'est pas influencée par l'âge, mais que la position initiale de la barre peut provoquer un effet cadre, surtout quand elles ne sont pas contrebalancées ou quand elles sont imposées sur une longue durée.

Méthodologie générale

Cette section présente la méthodologie générale utilisée dans les six études qui constituent ce travail de thèse. Les participants, le dispositif expérimental, les modalités sensorielles y sont décrits.

Quatre populations différentes seront étudiées : des participants sains, jeunes, seront d'abord inclus de manière à valider l'utilisation du modèle dans la perception des orientations. Une population de patients cérébro-lésés droits présentant des signes de négligence ou pas et présentant une hémianopsie ou pas sera incluse pour mesurer l'impact d'une lésion cérébrale sur l'intégration multisensorielle dans la perception des orientations. Enfin, un groupe de participants sains plus âgés, appariés aux patients, constituera un groupe contrôle des performances obtenues chez les patients. Il servira également à comparer leurs performances avec celles des participants sains plus jeunes. Les populations seront présentées dans la section « Participants » de chaque étude.

Le dispositif expérimental est constitué d'un lit médicalisé sans accoudoir, permettant la position assise, ainsi que d'un tableau disposé dans le plan fronto-parallèle (voir la figure 1.2). Un disque en métal de 25 cm de diamètre dont la position est réglable est placé sur le tableau (figure 1.21). Une barre en métal de 25 cm de longueur, de 1,5 cm de largeur et de 1,5 cm de profondeur est fixée au centre du disque. Sa face avant est équipée de 10 diodes lumineuses rouges et il peut tourner autour de son axe, de $\pm 130^\circ$. Ce dispositif est relié à un potentiomètre de précision indiquant l'angle entre la barre et la verticale objective à 0.1° près (figure 1.22). Une valeur nulle

signifie que la barre est alignée avec la verticale objective, tandis qu'une valeur négative correspond à une déviation vers la gauche, et qu'une valeur positive correspond à une déviation dans le sens horaire. C'est le même matériel qui sera utilisé dans toutes les études. La partie « 2.2. Matériel » reste donc vide.

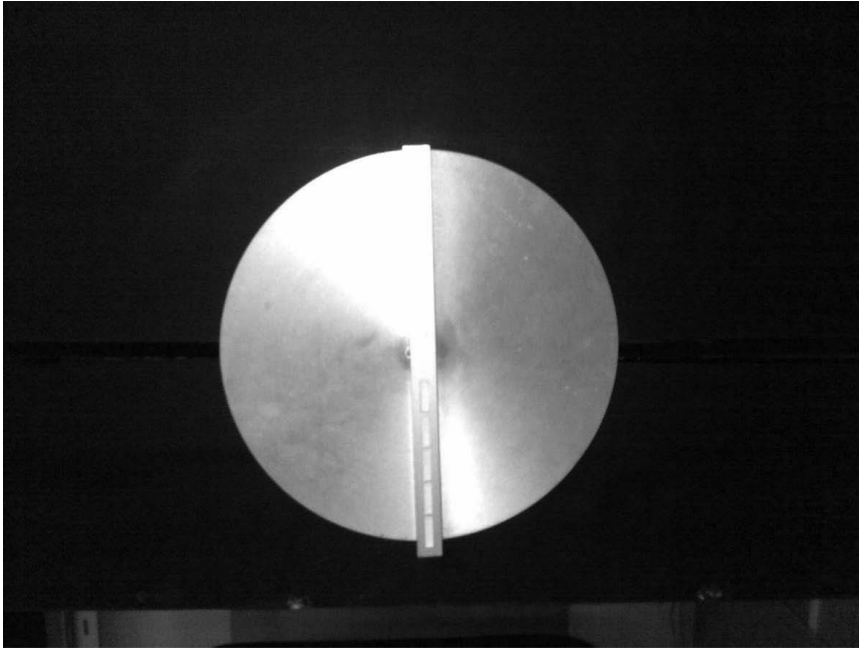


Figure 1.21 : Photo du disque métallique et de la barre lumineuse.

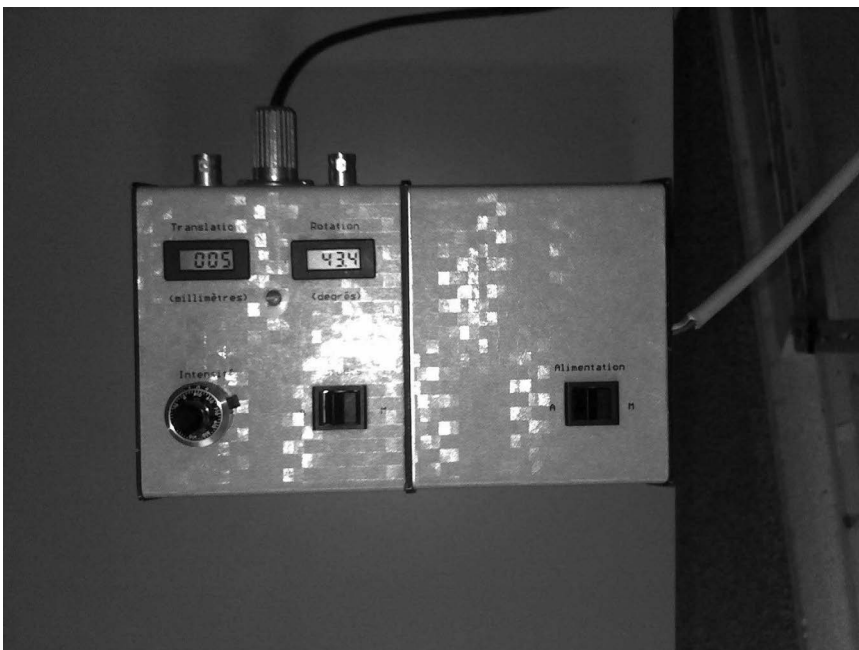


Figure 1.22 : Photo de l'afficheur du dispositif : le cadran de droite (Rotation) affiche la déviation de la barre par rapport à la verticale gravitaire à $0,1^\circ$ près. Le cadran de gauche, qui affiche la position du disque en translation, permet de s'assurer que le dispositif est correctement centré.

La manipulation de la barre est réalisée dans différentes modalités : visuelle, haptique et visuo-haptique. Dans la modalité visuo-haptique le participant voit la barre. Les ajustements sont réalisés avec la main droite, en tenant la barre par sa partie centrale. Dans la modalité visuelle, le participant voit la barre et les ajustements sont réalisés verbalement : le participant indique à l'expérimentateur de mettre la partie haute de la barre plus à droite ou plus à gauche, et de stopper quand la barre lui semble la verticale. Dans la modalité haptique, le participant ne voit pas la barre. A chaque essai, l'expérimentateur prend la main droite (ou gauche) du participant et la place au centre de la barre juste avant l'ajustement (la figure 1.23 illustre la symétrie des deux mains)

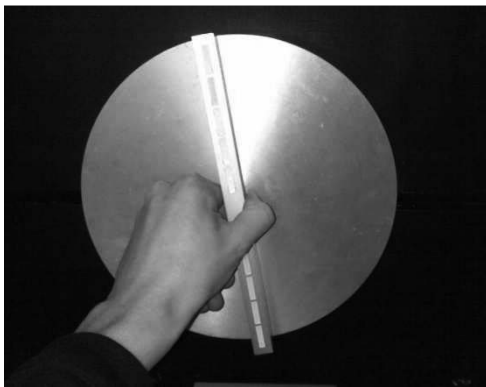


Figure 1.23 : Photos de la position des mains gauche et droite dans la tâche de VHS.

Chaque participant passe l'expérience de manière individuelle dans une salle calme et obscure. Il est placé au centre du lit médicalisé, maintenu par des sangles au niveau du torse et de la tête. Ces sangles l'aident à rester droit et minimisent les mouvements de la tête. L'ensemble de l'expérience est réalisé dans le noir. Les sections « 2.3. Procédure » précisent, pour chaque étude, les modalités utilisées, ainsi que les déviations initiales présentées et le nombre de répétition.

Certaines données seront analysées grâce au modèle statistique d'intégration d'Ernst et Banks (2002). D'autres feront plus simplement l'objet d'analyses de variance, de contrastes ou de comparaison *a posteriori*.

Première partie expérimentale : Étude des verticales subjectives

Etude I : Verticales subjectives chez les patients cérébro-lésés droits.

La rédaction de cette étude est réalisée à partir du Chapitre dont la référence est rappelée ci-dessous.

Braem B., Honoré J., Coello Y., Rousseaux M., Saj A. (2011). Evaluation et comparaison des verticales subjectives visuelle et haptique chez les patients cérébro-lésés droits. In : L. Defebvre, M. Lacour (Eds) Posture et Equilibre, Marseille : Solal.

Résumé

Les verticales subjectives (VS) ont été mesurées dans les modalités visuelle, haptique et visuo-haptique chez des patients cérébro-lésés droits avec ou sans négligence spatiale et avec ou sans hémianopsie. Seize patients sur 19 présentaient des déviations anti-horaires, plus importantes en cas de négligence spatiale ou d'hémianopsie. La VS haptique était davantage déviée que les VS visuelle et visuo-haptique. Tous les participants sains ainsi que 15 patients sur 19 avaient une VS visuo-haptique plus proche de la VS visuelle que de la VS haptique. Dans tous les groupes, la variabilité de la VS haptique était plus importante que celles des VS visuelle et visuo-haptique. Par ailleurs, la variabilité était la plus faible dans la modalité visuo-haptique. Dans tous les groupes, les données suggèrent une utilisation prédominante des informations visuelles dans la tâche de VS visuo-haptique.

Introduction

L'élaboration des représentations de la verticalité repose sur l'intégration d'informations provenant d'afférences multiples, visuelles, proprioceptives et vestibulaires, dont l'importance respective dépend de la tâche et de son contexte (e.g. Bronstein, 1999). Des anomalies de la verticale subjective visuelle dans le plan frontal ont été décrites en cas de lésions hémisphériques unilatérales. La déviation est le plus souvent anti-horaire lorsque la lésion affecte l'hémisphère cérébral droit (Brandt *et al.*, 1994; Yelnik *et al.*, 2002) ; elle est amplifiée quand les patients présentent des signes de négligence spatiale (Kerkhoff, 1999). Des troubles similaires de la perception de la verticale ont été mis en évidence dans la modalité haptique chez ces patients cérébro-lésés (Kerkhoff, 1999). Des déviations de la VS visuo-haptique ont été également observées, plus sévères chez les patients négligents, et plus encore dans leur héli-espace gauche (Saj *et al.*, 2005b).

Les patients cérébro-lésés droits peuvent présenter de nombreux troubles neurologiques, dont certains sont souvent associés à la négligence (Kerkhoff, 2001), notamment des amputations du champ visuel contralésionnel (hémianopsie latérale homonyme) ou des déficits du contrôle postural. Ces troubles posturaux associés s'expriment généralement par une déviation ipsilésionnelle du tronc, de la tête ou des yeux. Plus rarement, en cas de syndrome pusher associé, la déviation est contralésionnelle et le patient manifeste une résistance active lors de tentatives de redressement. Ces troubles posturaux influencent la VS : en effet, contrairement aux travaux cités plus haut qui montraient une déviation dans le sens anti-horaire chez les patients cérébro-lésés droits, l'étude de Saj *et al.*, (2005b) décrivait des déviations de la VS visuo-haptique dans le sens horaire chez des patients négligents, avec un syndrome pusher. Pour l'hémianopsie, différentes études ont montré qu'elle pouvait altérer la représentation corporelle (Ferber et Karnath, 2001 ; Saj *et al.*, 2012b). De Renzi *et al.* (1971) ont montré que des patients cérébro-lésés avec une amputation du champ visuel avaient des performances plus déficitaires dans une tâche de perception des orientations que des

patients présentant des lésions droite ou gauche sans hémianopsie. Saj *et al.*, (2012a) ont montré des performances équivalentes dans une tâche de perception de la verticale dans la modalité visuo-haptique.

La plupart des études réalisées dans le domaine de la VS portent sur les modalités visuelles ou haptiques. La comparaison directe de ces deux mesures est rare et lorsqu'elle est faite, les méthodes d'évaluation diffèrent. Par exemple, dans les études réalisées, la barre à ajuster avait un axe de rotation central pour la VS visuelle alors qu'elle était ancrée par son extrémité basse pour la VS haptique (Kerkhoff, 1999), ou bien la distance entre le participant et la barre différait dans les deux tâches (Bronstein *et al.*, 2003; Gentaz *et al.*, 2001). La VS visuo-haptique, qui n'a été étudiée que par une seule équipe (*e.g.* Saj *et al.*, 2005a), pose la question de l'intégration des informations visuelles et haptiques dans cette tâche multisensorielle. L'essentiel des travaux, déjà anciens, concernant l'intégration multisensorielle a porté sur les propriétés intrinsèques des objets. Ainsi, Rock et Victor (1964) ont montré que les informations visuelles et haptiques n'avaient pas la même pondération dans les estimations visuo-haptiques de la taille d'un objet. Dans le travail de Welch et Warren (1986), les estimations visuo-haptiques s'approchaient des évaluations (visuelles ou haptiques) les plus précises, c'est-à-dire les moins variables. L'étude de la variabilité des VS visuelle, haptique et visuo-haptique devrait permettre de vérifier si ces observations sont généralisables aux propriétés extrinsèques des objets, notamment pour le paramètre d'orientation.

En résumé, les données de la littérature suggèrent une déviation systématique de la VS dans le sens anti-horaire chez les patients cérébro-lésés droits (sauf en cas de syndrome pusher), avec une aggravation en cas de négligence spatiale, quelle que soit la modalité sensorielle utilisée. Peu de données existent sur l'influence de l'hémianopsie ainsi que sur les processus d'intégration multisensorielle. L'objectif de ce travail était ainsi 1) d'analyser l'influence de la négligence et de l'hémianopsie sur la VS, 2) de comparer les VS visuelle, haptique et visuo-haptique en utilisant un

même matériel et 3) d'évaluer les modes d'intégration des informations visuelles et haptiques dans l'évaluation de l'orientation.

Méthodes

Participants

Dix-neuf patients et huit participants sains ont participé à cette étude après avoir signé un accord de consentement éclairé. Tous étaient droitiers (score > 18/20 au test de latéralité de Edimbourg, Oldfield, 1971). Les patients, recrutés dans le service de Rééducation Neurologique de l'hôpital Swynghedauw du CHRU de Lille, étaient tous porteurs d'une lésion cérébrale consécutive à un accident vasculaire cérébral droit relativement récent (5-20 semaines) documenté par IRM ou scanner. La présence de signes de négligence spatiale gauche était évaluée par une batterie de tests neuropsychologique : test de barrage (Gauthier *et al.*, 1989), bissection de lignes (Schenkenberg *et al.*, 1980) et copie de scène (Ogden, 1985). Un patient était diagnostiqué comme négligent (N+) lorsqu'il échouait à au moins deux tests sur trois. Les autres patients étaient inclus dans les groupes N-. Les patients ont également passé un examen de champ visuel permettant de déceler les signes d'une hémianopsie : les patients qui obtenaient un score positif à ce test étaient placés dans les groupes H+, et les autres dans les groupes H-. Les patients présentant un syndrome pusher (Karnath *et al.*, 2000 ; Saj *et al.*, 2005b), des lésions bilatérales, des antécédents neurologiques ou psychiatriques, des signes d'atteintes vestibulaires (vertiges, nystagmus), des troubles sévères du comportement ou une atteinte motrice du bras droit étaient exclus de l'étude.

Quatre patients avec une négligence et une hémianopsie (N+H- : âge moyen 64,2±8,8 ans), 6 avec une négligence mais sans une hémianopsie (N+H+ : âge moyen 63,5±13,7 ans), 7 sans négligence et sans hémianopsie (N-H- : âge moyen 57,4±14,4ans), 2 sans négligence mais avec une hémianopsie (N-H+ : âge moyen 41,5±19,1 ans) et 8 participants sains (C : âge moyen 53,5±6,9 ans). Les données cliniques des patients sont données dans le tableau 1. Les groupes ne se

différencient pas par l'âge moyen ($F(4, 22)=1,82$; $p=0,16$), le sexe ($F(4 ; 22)=1,16$; $p=0,35$) ou le niveau d'éducation ($F(4 ; 22)=0,82$; $p=0,52$).

Groupe	Age (en années)	Sexe	Années d'étude	Délai (en semaines)	Test de barrage			Copie de scène (/4)	Bissection (%)	Hémianopsie
					Gauche (/15)	Centre (/5)	Droite (/15)			
N+H-	60	M	13	8	10	2	1	4	43	-
N+H-	70	M	11	10	7	1	0	4	46	-
N+H-	54	F	10	9	5	0	2	0	30	-
N+H-	73	F	8	7	7	0	2	0	15	-
N+H+	55	M	15	5	15	2	0	1	67	+
N+H+	54	M	15	8	15	5	10	4	70	+
N+H+	46	F	10	5	5	0	2	3	16	+
N+H+	70	F	8	10	7	0	2	0	18	+
N+H+	76	F	11	5	15	5	5	4	74	+
N+H+	80	F	8	7	8	1	3	2	20	+
N-H-	70	F	8	9	0	0	1	0	9	-
N-H-	62	M	20	16	2	0	2	0	-1	-
N-H-	69	M	8	20	1	0	0	0	3	-
N-H-	58	M	19	10	0	0	0	0	6	-
N-H-	56	M	11	8	2	0	1	0	-2	-
N-H-	60	M	14	6	0	0	0	0	-1	-
N-H-	27	M	13	13	2	0	0	0	1	-
N-H+	28	F	8	4	1	0	0	0	4	+
N-H+	55	M	17	17	0	0	0	0	-2	+

Tableau1 : Données cliniques des patients présentant le groupe d'inclusion, l'âge, le nombre d'années d'études, le délai entre le moment de la lésion et de l'inclusion dans l'étude, les tests cliniques d'inclusion comprenant le nombre d'omissions (pour le barrage de cloches), le score de la copie de scène (score de 0 à 4), le pourcentage moyen de déviation au test de bissection de lignes et la présence d'une hémianopsie.

Matériel

Voir la partie «Méthodologie générale» au début de la partie «Contributions expérimentales»

Procédure

Les participants étaient assis au centre du lit médicalisé, jambes allongées, maintenu par une sangle au niveau du torse et au niveau de la tête de manière à rester droit et d'empêcher les mouvements, dans l'obscurité. La barre lumineuse était située en face du torse des participants à environ 50 cm, et son ajustement avec la verticale gravitaire était réalisé dans trois conditions expérimentales : visuelle (VVS), haptique (VHS) et visuo-haptique (VVHS). Pour la VVS, le participant percevait visiblement la barre mais les ajustements étaient réalisés par l'expérimentateur sur indications verbales du participant. Pour la VHS, le participant ne percevait pas visuellement la barre ; il devait placer la barre à la verticale après que l'expérimentateur lui ait placé la main droite au centre de la barre. Pour la VVHS, le participant percevait visuellement la barre et les ajustements étaient réalisés avec la main droite, en tenant la barre en son centre. La position initiale de la barre était de 0° , $+45^\circ$ ou -45° . Chaque participant réalisait 6 essais par modalité et par position initiale de la barre pour un total de 54 essais. La durée des ajustements, qui ne dépassait pas quelques secondes, n'a pas été prise en compte. Un délai de 10 secondes séparait chaque ajustement. Les participants devaient fermer les yeux entre chaque essai. Aucun feed-back n'était apporté pendant l'épreuve.

Analyses statistiques

Pour chaque participant, une moyenne et un écart-type ont été calculés pour chaque condition expérimentale. Des analyses de la variance ont été réalisées indépendamment pour chacun de ces paramètres. Les comparaisons a posteriori ont été effectuées à partir du test de Duncan. Le risque alpha était fixé à 5%.

Résultats

Une exploration rapide des données montre que la plupart des patients présentaient une déviation anti-horaire de leur verticale subjective, toutes modalités confondues : seulement trois patients dans le groupe N-H- présentent des déviations horaires (le premier présentait une déviation horaire dans la modalité haptique, le second présentait une déviation horaire dans les modalités visuelle et visuo-haptique et le troisième présentait des déviations horaires dans les trois modalités). Trois patients et un sujet sain ont révélé une VHS plus proche de la VVHS alors que 16 patients et 7 participants sains ont une VVS plus proche de la VVHS

Moyennes

Afin de comparer les performances des participants sains et des patients, une première analyse de variance a été réalisée à partir des moyennes, en prenant en compte le facteur groupe et le facteur répété modalité. Cette analyse a révélé un effet du groupe ($F(4,22)=5,88$; $p=0,002$) : les performances sont proches de la verticale gravitaire pour le groupe C (-1.06°), alors qu'elles sont déviées dans le sens anti-horaire chez les patients ($N+H- = -3.3^\circ$; $N+H+ = -5.6^\circ$; $N-H- = -2.0^\circ$; $N-H+ = -4.6^\circ$). Les 2 groupes de patients H+ diffèrent significativement des C ($N+H+$, $p=0,003$ et $N-H+$, $p=0,017$). Il existe également un effet de la modalité ($F(2,44) = 10,79$; $p < 0,001$), mais pas d'interaction avec le groupe ($F(8,44) = 0,54$; $p = 0,819$) : les performances sont davantage déviées dans la modalité haptique (-5.0°) que dans les autres modalités (-2.6° en VVS et -2.4° en VVHS), quel que soit le groupe (Figure 1).

Une seconde ANOVA a été réalisée à partir des moyennes des patients uniquement, en considérant les facteurs négligence (N+, N-) et hémianopsie (H+, H-), ainsi que le facteur modalité. Les résultats mettaient en évidence un effet de l'hémianopsie ($F(1,15) = 5,15$; $p = 0,038$). Les déviations passent de $-2,7^\circ$ pour le groupe sans hémianopsie à $-5,1^\circ$ ($p=0,015$) pour le groupe avec hémianopsie. L'effet de la négligence n'était pas significatif ($F(1,15) = 1,02$; $p = 0,329$), mais on

observe une dégradation des performances chez les patients négligents : les déviations passent de $-3,3^\circ$ chez les non négligents, à $-4,5^\circ$ chez les patients négligents. Le facteur modalité reste significatif ($F(2,30) = 7,44$; $p = 0,002$) mais n'interagit pas avec la négligence ($F(2,30) = 0,36$; $p=0,698$), ni avec l'hémianopsie ($F(2,30) = 0,58$; $p = 0,565$). Aucun autre effet n'est significatif.

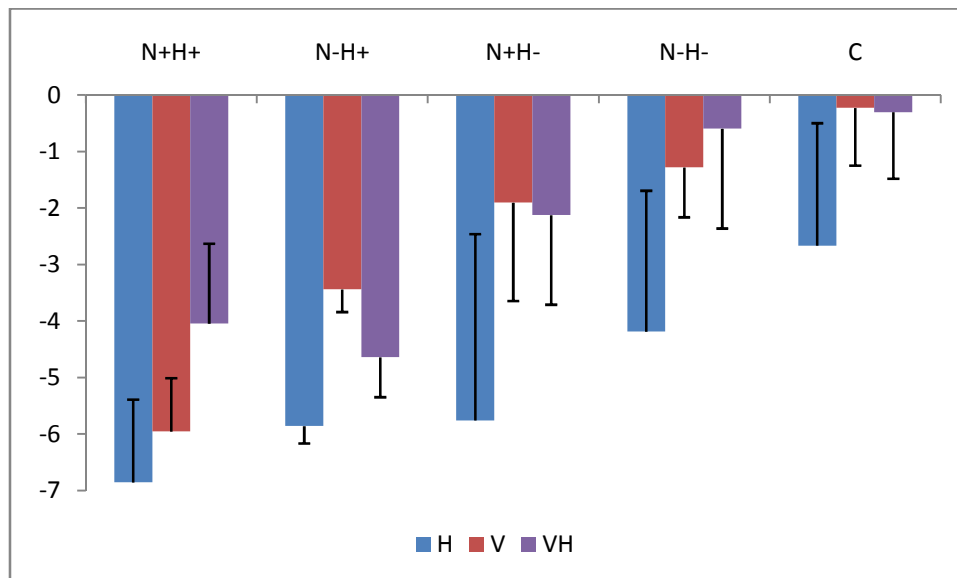


Figure 1 : Verticales subjectives (erreurs constantes) en fonction du groupe de participants et de la modalité (quand il n'est pas défini, l'axe des ordonnées correspond aux erreurs variables ou constantes de la perception de la verticale, en degrés et les barres d'erreur correspondent aux écarts-types indépendamment des différences entre les sujets).

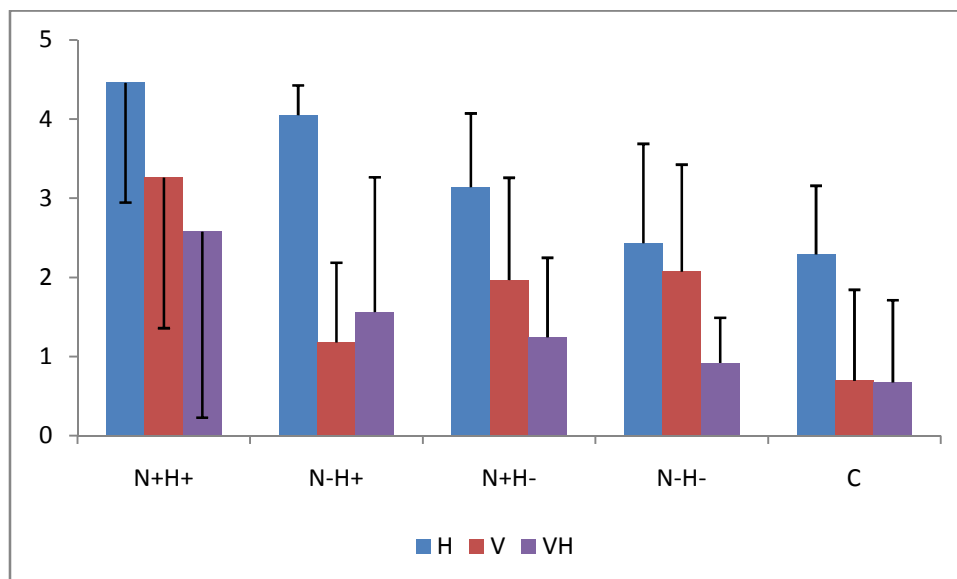


Figure 2 : Erreurs variables en fonction du groupe et de la modalité.

Écarts-types

Une troisième analyse de variance a été réalisée à partir des écarts-types, en prenant en compte le facteur groupe et le facteur répété modalité (Figure 2). Cette analyse ne montre pas d'effet du groupe ($F(4,22) = 1,79$; $p = 0,175$) : les écarts-types moyens sont compris entre $2,3^\circ$ (groupe N-H+) et $3,7^\circ$ (groupe N+H+). Il existe en revanche un effet de la modalité ($F(2,44) = 18,77$; $p < 0,001$), ainsi qu'une interaction entre la modalité et le groupe ($F(8,44) = 2,49$; $p = 0,025$) : les écarts-types (figure 2) sont plus importants en modalité haptique ($3,9^\circ$) qu'en modalité visuelle ($2,3^\circ$) ; ils sont en moyenne les plus faibles dans la modalité visuo-haptique ($2,0^\circ$). Les différences les plus grandes sont entre les groupes N-H+ et C.

Une quatrième ANOVA a été réalisée à partir des écarts-types des patients, en prenant en compte les facteurs de groupe négligence (N+, N-) et hémianopsie (H+, H-) et le facteur répété modalité. Seul l'effet de la modalité est significatif ($F(2,30)=6,65$; $p=0,004$).

En résumé, les patients cérébro-lésés droits ont une perception de la verticale déviée dans le sens anti-horaire quelle que soit la modalité. Il y a peu de différence entre les VVS et VVHS alors que ces dernières sont systématiquement différentes de la VHS. Les déviations sont amplifiées dans la modalité haptique pour tous les groupes. Elles sont également amplifiées pour les patients négligents et pour les patients avec hémianopsie, quelle que soit la modalité. Dans la modalité haptique, les écarts-types sont plus importants pour tous les groupes. Les écarts-types les plus faibles sont trouvés pour la VVHS.

Discussion

Le but de cette étude était de comparer les verticales subjectives des patients cérébro-lésés droits avec ou sans négligence spatiale gauche et avec ou sans hémianopsie. La comparaison portait également sur les performances obtenues dans les modalités visuelles, haptiques et visuo-haptiques,

et cela en utilisant le même matériel et une méthode de recueil des mesures semblable pour chaque modalité.

Cette étude confirme en premier lieu les déviations antihoraires de la VS chez les patients cérébro-lésés droits. Les plus grandes déviations chez les patients négligents que chez les participants contrôles est en accord avec les données antérieures obtenues en modalité visuelle (Kerkhoff, 1999), en modalité visuo-haptique (*e.g.* Saj *et al.*, 2005a) et en modalité haptique (Funk *et al.*, 2010a ; Kerkhoff, 1999). Toutefois, cette étude n'a pas permis de retrouver la différence généralement observée entre les patients cérébro-lésés droits avec et sans négligence, bien que l'amplitude des déviations soit plus marquée chez les patients avec négligence.

Les résultats indiquent également une augmentation des déviations de la VS chez les patients avec hémianopsie. En absence d'information visuelle, les performances sont déviées dans le sens antihoraire pour les quatre groupes de patients, mais on observe une déviation des VVS et des VVHS moindre pour les patients sans hémianopsie, confirmant d'autres études dans ce domaine (Saj *et al.*, 2012a). Les informations visuelles permettraient donc de compenser les mauvaises performances obtenues dans le cas de l'hémianopsie. Ici, les patients avec une hémianopsie pure ont une VS plus déviée que celle des patients avec une négligence isolée. On assiste de plus à un effet cumulatif puisque les patients négligents et avec hémianopsie montrent une déviation de la VS plus marquée. Il est intéressant de noter que dans certaines tâches visuo spatiales, comme l'estimation du droit devant subjectif, cet effet cumulatif peut entraîner une réduction des déviations. Par exemple, Ferber et Karnath (1999) observent une déviation contralésionnelle pour les patients avec une hémianopsie pure, une déviation ipsilésionnelle pour les patients avec une négligence pure et une absence de déviation pour les patients présentant les deux troubles. Toutefois, l'effet de l'hémianopsie chez les patients cérébro-lésés droits reste un sujet de controverse. Saj *et al.*, (2010) observent en effet une déviation ipsilésionnelle du droit devant équivalente pour les patients avec une négligence pure et pour les patients avec une hémianopsie pure, ainsi qu'une déviation

ipsilésionnelle plus importante pour les patients présentant les deux troubles. Ces deux études ont toutefois utilisées des méthodologies différentes. Ferber et Karnath (2001) ont utilisé une tâche d'alignement de deux points lumineux, tandis que Saj *et al.*, (2010) ont utilisé une tâche d'ajustement visuo-moteur d'une barre lumineuse. La présence d'une diminution (Ferber et Karnath, 2001) ou d'une augmentation (Saj *et al.*, 2010) des déviations pourrait également être expliquée par un phénomène de compensation dépendant de l'étendue de la période post-lésionnelle. Pour des lésions récentes, un biais visuel vers la droite pourrait être observé chez les patients avec une hémianopsie, tandis qu'une surcompensation et donc un biais vers la gauche pourrait être observée pour des lésions plus ancienne. Machner *et al.* (2009) apportent des éléments en faveur de cette hypothèse. Dans une tâche de bissection de lignes, les patients avec une hémianopsie gauche pure récente (moins d'un mois) présentent une légère déviation ipsilésionnelle alors que la déviation est contralésionnelle pour les patients dont les lésions sont plus anciennes (plus de 3 mois, Kerkhoff *et al.*, 2008). Machner *et al.* (2009) expliquent cet effet en termes de compensation post-lésionnelle. Saj *et al.*, (2012b) en font une démonstration en comparant les performances de patients cérébro-lésés droits avec ou sans négligence et avec ou sans hémianopsie. Ils montrent qu'en phase aigue (en moyenne 41 jours après l'AVC), les patients avec hémianopsie ont des performances davantage déviées du côté ipsi-lésionnel par rapport aux performances obtenues plus tardivement (en moyenne 25 jours après la première évaluation).

Les déviations de la VHS sont observées chez les patients cérébro-lésés droits comme attendues (Funk *et al.*, 2010a; Kerkhoff, 1999), bien qu'une déviation dans le sens anti-horaire ait été également observée dans le groupe contrôle. Les participants contrôles révèlent ainsi une déviation de la VHS malgré des performances très proches de la verticale gravitaire dans les conditions VVS et VVHS. Ce résultat est à souligner car il suggère que la perception de la verticale dépend des modalités sensorielles mises en jeu. Il est toutefois possible d'envisager que l'absence d'exploration haptique dans cette tâche soit à l'origine des déviations observées. Puisque tous les participants

étaient droitiers et qu'ils ont réalisé la tâche avec la main droite, une explication en termes de contraintes mécaniques est de ce fait envisageable : en position bras fléchi et épaule tournée vers l'intérieur (car le disque est face au participant et non pas face à l'épaule), il semble que la position de la main soit davantage marquée par une pronation. Il est ainsi possible que cette position induise un biais d'estimation de l'orientation de la main produisant une déviation anti-horaire, non corrigée de l'estimation de la verticale en l'absence de feed-back visuel.

Les résultats montrent également une différence significative entre les performances dans les tâches visuelle et visuo-haptique d'une part et la tâche haptique d'autre part. Ce résultat est en accord avec d'autres études ayant montré des erreurs plus importantes dans la modalité haptique que dans la modalité visuelle. En effet, Pérennou (2008) a montré, sur une population importante de participants sains, des performances comprises entre $\pm 2,5^\circ$ pour la VVS contre $\pm 4,5^\circ$ pour la VVHS. Tout en corroborant ces résultats, l'étude que nous avons réalisée révèle pour la première fois que la VVHS n'est pas différente de la VVS pour les participants sains mais également pour les patients cérébro-lésés. En pratique, il n'y a donc pas lieu de préférer l'une ou l'autre de ces conditions; cependant la VVHS donne des résultats plus précis car légèrement moins variables.

Un autre point important est la différence de performance importante entre les VVS et les VHS observée pour tous les patients et tous les participants sains : en raison de cette différence, la question de l'intégration des informations visuelles et haptiques dans la tâche de VVHS se pose. Les travaux de Welch et Warren (1986) ont montré qu'en cas de conflit sensoriel, l'intégration se fait en faveur de la modalité la plus précise. De plus, l'approche bayésienne de l'intégration multimodale d'Ernst et Banks (2002) postule que le système cognitif intègre les signaux visuels et haptiques dans le but de minimiser la variance dans les performances visuo-haptique. Un des signes de cette intégration est la présence d'une variabilité multisensorielle plus faible que les variabilités propres à chaque modalité sensorielle. Les résultats de notre étude montrent que la VVS est moins variable que la VHS, et que la VVHS est plus proche de la VVS que de la VHS. Par ailleurs, les

écarts-types sont plus petits dans la modalité visuo-haptique. La variabilité des estimations étant plus faible dans la condition VVHS que dans les autres conditions, nos données vont ainsi dans le sens d'une intégration des signaux visuels et haptique dans la modalité visuo-haptique pour l'ensemble des participants, en privilégiant les informations sensorielles les plus précises en accord avec le modèle d'Ernst et Banks (2002).

Deuxième partie expérimentale : Intégration multisensorielle et verticale subjective

Etude II : Validation du modèle d'intégration multisensorielle pour la perception de la verticale subjective chez les participants sains

Résumé

La perception de la verticale gravitaire (VG) est généralement étudiée via la modalité visuelle (VVS) ou haptique (VHS). L'utilisation combinée des ces deux modalités simultanément (VVHS) reste plus rare. Pourtant, l'utilisation de cette dernière modalité pose la question de l'intégration des informations visuelles et haptiques dans la réalisation de cette performance : cette tâche nécessite-t-elle une combinaison des deux sens, ou requiert-elle uniquement l'utilisation de la vision ou du sens haptique ? Autrement dit, qu'apporte chaque modalité dans la réalisation de cette performance. Ici, des participants sains jeunes (moins de trente ans) doivent ajuster avec la main droite une barre avec la verticale gravitaire dans les trois modalités. Via un modèle d'intégration des informations visuelles et haptiques, les données concluent à l'utilisation préférentielle des informations visuelles (le poids des informations visuelles est supérieur à 90%) mais avec tout de même une intégration des informations haptiques lors des performances en VVHS. Les données montrent également que la VVS et la VVHS ne diffèrent pas significativement et qu'elles sont proches de la VG, alors qu'elles sont toutes deux différentes de la VHS : cette dernière est généralement déviée dans le sens horaire. De plus, alors que les VVS et VVHS ne diffèrent pas en fonction de la position initiale de la barre, les performances en VHS montre une déviation systématique en direction des positions initiales. Ces deux derniers résultats suggèrent la mise en place de référentiels différents entre les différentes conditions ainsi que la présence de contraintes mécaniques dans la tâche de VHS.

Introduction

La perception des différentes propriétés des objets qui nous entourent est une étape indispensable à la connaissance de notre environnement et à nos interactions avec et dans ce dernier. Certaines de ces propriétés ne sont perçues que par un sens unique : c'est le cas par exemple de la perception des couleurs réalisée via le système visuel, de la perception d'une odeur réalisée via le système olfactif ou de la perception d'un son réalisée via le système auditif. D'autres propriétés peuvent être perçues par différents systèmes sensoriels : par exemple la taille des objets peut être évaluée par les systèmes visuels ou haptiques, et également par l'utilisation combinée de ces deux sens. C'est aussi le cas pour la perception de la forme des objets et également pour la perception de leurs orientations.

Dans le cas de la perception multisensorielle, l'utilisation de différents signaux est une problématique importante : on peut en effet se demander si, dans cette condition, la perception est basée sur une sensibilité en particulier, ou si elle est réalisée par une combinaison des différentes sensibilités. Cette problématique n'est pas récente puisque Rock et Victor en posaient les bases en 1964.

Récemment, Ernst et Banks (2002) ont entrepris la modélisation de l'intégration des informations visuelles et haptiques dans l'estimation d'une propriété intrinsèque d'un objet (sa taille). Dans cette étude, la taille d'un objet peut être estimée en utilisant soit les informations visuelles (V), soit en utilisant les informations haptiques (H), soit en utilisant ces deux informations simultanément (visuo-haptique, VH). Alors que les informations haptiques restent inchangées, les informations visuelles sont rendues plus ou moins précises par l'application d'un bruit visuel aléatoire plus ou moins important. Les deux stimuli sont placés de manière à donner l'illusion qu'ils sont un seul et unique objet. Des points d'égalisation subjective ainsi que des variances sont calculés dans chaque condition (visuelle, haptique et visuo-haptique). Ils montrent, grâce à une analyse statistique apparentée au maximum de vraisemblance, que l'estimation visuo-haptique de la taille de l'objet

peut être prédite à partir des estimations visuelles et haptiques pondérées par la précision de ces estimations. Un autre résultat important est la présence d'une variabilité plus petite en condition visuo-haptique qu'en condition visuelle ou haptique. Ils en concluent que le système cognitif est un système qui tend vers un critère d'optimalité basé sur la précision de ses réponses.

Plus récemment encore, Gori *et al.*, (2008) ont posé la question de l'émergence de cette stratégie qui vise à pondérer les informations visuelles et haptiques afin de minimiser la variance visuo-haptique. Ils ont utilisé un matériel proche de celui de Ernst et Banks (2002), mais adapté aux enfants. L'étude porte sur la perception de la taille de l'objet et sur son orientation. Les résultats montrent qu'avant 8 ans, les enfants utilisent préférentiellement les informations haptiques dans une tâche de perception de la taille alors qu'ils utilisent préférentiellement les informations visuelles dans une tâche de perception de l'orientation et que progressivement les stratégies se modifient jusqu'à atteindre à l'âge de dix ans une intégration multisensorielle basée sur la précision des estimations.

Dans leur étude, Gori *et al.*, (2008) utilisent une méthode d'évaluation qui diffère sensiblement de celle utilisée chez Ernst et Banks (2002). La différence la plus importante réside sûrement dans le fait que les deux stimuli ne sont pas superposés. De plus, ils évaluent également la perception des orientations. Leur méthode d'évaluation est donc d'abord validée sur un groupe de 3 participants sains adultes. Les résultats sont proches de ceux obtenus par Ernst et Banks (2002) : les participants intègrent donc les informations visuelles et haptiques de manière à augmenter la précision des estimations visuo-haptiques dans une tâche de perception de la taille et des orientations d'un objet. Ce modèle d'intégration qui était validé pour des propriétés intrinsèques (leur taille, Ernst et Banks, 2002) l'est donc également pour les propriétés extrinsèques (leur orientation, Gori *et al.*, 2008).

L'orientation la plus étudiée est la verticale. Il existe trois types de verticales (Luyat *et al.*, 1997). La verticale gravitaire, qui correspond à la force d'attraction qui attire vers le centre de la Terre tous les objets qui y sont exposés : c'est par exemple la direction du fil à plomb. La verticale posturale est la

direction que prend le corps en réaction à la force de gravité. La verticale subjective (VS) qui correspond à la perception que l'on a de la verticale gravitaire. Les méthodes d'évaluation de la verticale posturale et de la verticale subjective diffèrent. Ces deux verticales ne sont pas indépendante et les changements de posture peuvent influencer la verticale subjective : une inclinaison en roulis du corps entraîne une déviation de la verticale subjective dans le sens opposé (effet Muller), alors qu'une inclinaison en roulis de plus de 60° entraîne une déviation de la verticale subjective dans le sens de l'inclinaison du corps (effet Aubert, Bauermeister *et al.*, 1964).

Les modalités pour évaluer la VS sont faciles à mettre en place. Dans la modalité visuelle, une barre lumineuse est placée dans le noir. Le participant qui se trouve en face doit l'aligner avec la verticale gravitaire en utilisant des boutons, un joystick ou sur indication verbale. Dans la modalité haptique, la barre est éteinte et le participant doit l'aligner à la verticale en utilisant uniquement les informations fournies par sa main. Une troisième modalité d'évaluation a été mise en place par une équipe étudiant la perception des orientations chez des patients cérébro-lésés droits. Il s'agit de la modalité visuo-haptique, dans laquelle, les participants doivent aligner la barre lumineuse en utilisant la main dominante. L'utilisation de ces modalités d'évaluation diffèrent fortement de la méthode utilisée par Gori *et al.*, (2008) : dans les différentes études évaluant la perception de la verticale, la barre n'est pas statique et doit toujours être ramenée dans une direction particulière, alors que chez Gori la barre est fixe et différentes orientations sont testées.

L'utilisation d'une modalité visuo-haptique dans la perception de la verticale subjective pose donc la question de l'intégration des informations visuelles et haptiques dans la réalisation de cette performance. Pourtant, peu d'études sont réalisées dans cette modalité.

Dans cette étude, nous voulons évaluer les différences de performance de la VS dans les modalités visuelle (VVS), haptique (VHS) et visuo-haptique (VVHS), en utilisant un matériel identique et une méthodologie la plus semblables dans les trois conditions. Ainsi, une comparaison directe de ces trois modalités sera apportée. De plus, le protocole fournira des moyennes et des variances pour les

trois modalités, ce qui permettra l'application du modèle d'intégration d'Ernst et Banks (2002) aux données observées. Comme dans l'étude de Gori *et al.*, (2008) nous supposons que le modèle Ernst et Banks (2002) peut s'appliquer à cette modalité d'évaluation de la verticale.

Méthodes

Participants

Vingt et un participants sains ont participé à l'étude (moyenne d'âge 24 ans). Ils sont tous droitiers (questionnaire de latéralité d'Edinburg). Ils ont par ailleurs signé un formulaire de consentement éclairé. Aucun ne souffre d'amputation du champ visuel ou de maladie neurologique et ils ont tous une vue normale ou corrigée.

Matériel

Voir la partie «Méthodologie générale» au début de la partie «Contributions expérimentales».

Procédure

Les participants sont placés sur le lit médicalisé à une distance de 40 cm environ (en fonction de la taille du bras, l'objectif étant de ne pas avoir le bras tendu) et aligné avec le visage. Leur tête est maintenue au moyen d'une sangle. La consigne est d'aligner la barre avec la verticale gravitaire en utilisant les informations visuelles (V), haptiques (H) ou les deux (VH). Dans la modalité visuelle (VVS), les participants voient la barre mais ne peuvent la toucher : ils indiquent oralement à l'expérimentateur comment placer la barre pour l'aligner avec la verticale gravitaire. Ils indiquent si le haut de la barre doit tourner vers la droite ou la gauche. Dans la modalité haptique (VHS), les participants ont les yeux bandés. Leur main droite est placée par l'expérimentateur au centre de la barre éteinte. Celle-ci est ramenée à la verticale par le sujet. Dans la modalité combinée (VVHS), la barre allumée est ramenée à la verticale par le sujet par l'utilisation de sa main droite.

Lors de la consigne, l'importance de la précision des performances est citée. Le temps de réalisation n'est pas pris en compte, mais les ajustements sont généralement rapides, n'excédant pas quelques secondes.

Chaque sujet passe les 3 modalités (Modalité M = VVS, VHS et VVHS). Le disque est toujours placé face au sujet, mais la barre est initialement inclinée (Barre B = -45° , -22.5° , 22.5° et 45°). Par convention, un signe négatif correspond à une orientation anti-horaire. Chaque participant réalise 4 ajustements par position initiale de la barre pour un total de 48 ajustements ($3M \times 4B \times 4R$).

Chaque condition est contre balancée. Les données recueillies sont la déviation de la barre par rapport à la verticale gravitaire en degrés (à $0,1^\circ$ près).

Résultats

Evaluation des déviations des verticales subjectives

Pour chaque condition initiale, une moyenne et un écart-type sont calculés. Des analyses de la variance sont réalisées sur ces mesures séparément en prenant en compte la modalité et la position initiale de la barre.

L'analyse de variance réalisée sur les moyennes montre une interaction entre la modalité et la position initiale de la barre ($F(6, 120) = 23,04$; $p < 0,001$), ainsi qu'un effet de la modalité ($F(2, 40) = 20,08$; $p < 0,001$) et un effet de la position initiale de la barre ($F(3, 60) = 25,77$; $p < 0,01$). Les résultats indiquent que la VVS ($0,01^\circ \pm 0,99^\circ$) et la VVHS ($0,04^\circ \pm 0,92$) ne diffèrent pas ($p = 0,97$) et sont proches de la VG (respectivement $t_{20} = 0,06$; $p = 0,95$ et $t_{20} = 0,18$; $p = 0,86$). Elles sont au contraire toutes les deux différentes ($p < 0,01$) de la VHS ($3,12^\circ \pm 3,94^\circ$) qui diffère de la VG ($t_{20} = 4,57$; $p < 0,01$). Par ailleurs, alors que la position initiale de la barre n'influence pas la VVS ($p > 0,79$) et la VVHS ($p > 0,86$), la VHS dépend de la position initiale ($p < 0,01$) de la barre et est déviée vers elles (Figure 2.3).

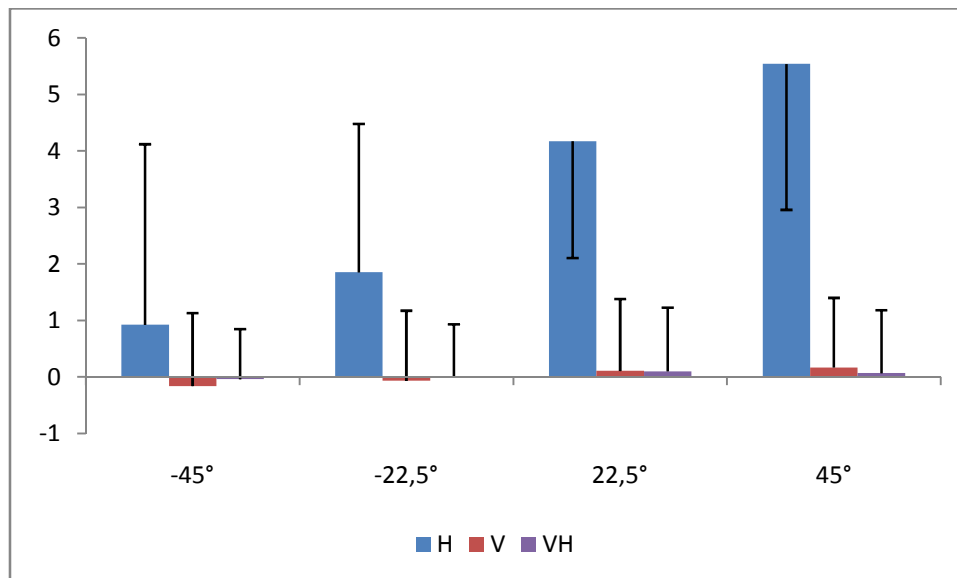


Figure 2.3 : Verticale Subjective (erreurs constantes) en fonction de la modalité et de l'inclinaison initiale de la barre.

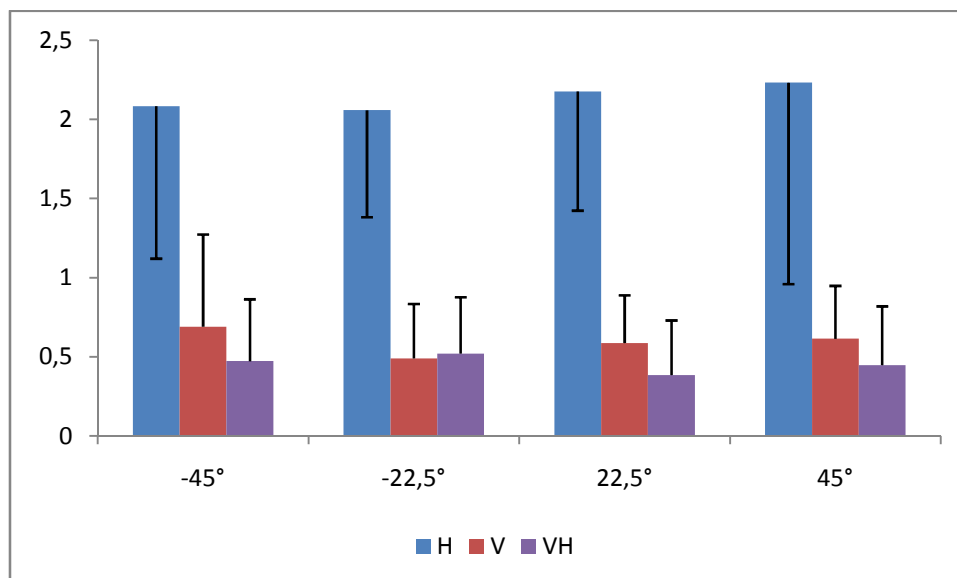


Figure 2.4 : Erreurs variable en fonction de la modalité et de l'inclinaison initiale de la barre.

L'analyse de variance réalisée sur les écarts-types montre un effet de la modalité ($F(2, 40) = 82,65$; $p < 0,01$), sans effet de la position initiale de la barre ($F(3,60) = 0,23$; $p = 0,88$) ni interaction ($F(6, 120) = 0,40$; $p = 0,87$). Les résultats indiquent que les écarts-types de la VHS ($2,14^\circ \pm 1,10^\circ$) diffèrent de ceux de la VVS ($0,59^\circ \pm 0,41^\circ$; $p < 0,01$) et de la VVHS ($0,46^\circ \pm 0,24$; $p < 0,01$) et les écarts-types de la VVS et de la VVHS ne diffèrent pas ($p = 0,34$). Par ailleurs, la position initiale n'influence pas les écarts-types ($p > 0,61$; figure 2.4).

Un contraste est réalisé sur les écarts-types également en raison de l'hypothèse d'écarts-types plus faibles dans la modalité visuo-haptique que dans les modalités visuelles ou haptiques. Les résultats de ce contraste valide l'hypothèse ($F(1, 20) = 77,20$; $p < 0,01$).

Evaluation des pentes.

Une pente est calculée pour les 3 conditions à partir des moyennes. Elle donne une estimation de la droite de régression linéaire (entre les angles de départ (-45° , $-22,5^\circ$, $22,5^\circ$, 45°) en abscisse et les moyennes (ou écarts-types) associées en ordonnée.) Une pente proche de 0 signifie une constance des mesures, une pente qui tend vers 1 signifie que les mesures augmentent alors qu'une pente qui tend vers -1 signifie que les mesures diminuent. Une pente de 0,05 est mesurée dans la condition haptique alors que les pentes pour les modalités visuelles (0,004) et visuo-haptiques (0,001) sont dix fois plus petites.

Evaluation du poids théorique des informations visuelles et haptiques

A partir des équations (1) et (2) de la partie 2.4. de la partie introductive, les poids théoriques sont calculés. Ces poids donnent une estimation de la précision relative des modalités visuelles et haptiques. Si les deux modalités ont la même précision, les poids sont égaux à 0,5. Plus un système est précis, plus son poids est important. La somme des deux poids est toujours égale à 1.

Le poids des estimations visuelles et haptiques sont calculées pour chaque sujet. Une analyse rapide montre que le poids des estimations visuelles est important : la valeur la plus faible est de 0,84 alors que le maximum est de 0,99. Le poids des informations visuelles est donc plus important (en moyenne 0,94) que celui des informations haptiques (en moyenne 0,06).

Estimation des moyennes théoriques

A partir du poids des estimations individuelles visuelles et haptiques calculés et des moyennes des estimations individuelles visuelles et haptiques, il est possible de donner une valeur théorique des estimations individuelles visuo-haptiques (équation 3 de la partie 2.4. de la partie introductive). Ces valeurs théoriques sont calculées et comparées à celles observées chez les participants. Une analyse rapide montre que les valeurs théoriques et les valeurs observées sont proches : la différence absolue entre ces deux valeurs est comprise entre 0,04 et 1,56. L'équation de la droite de corrélation entre les valeurs prédites et observées est $y = 0,75 x + 0,19$ (Figure 2.5). La corrélation est significative ($r = 0,64$, $p < 0,01$).

Comparaison des variances

Un des signes le plus signifiant dans le modèle d'intégration que nous testons ici est la présence d'une variance des estimations visuo-haptiques plus petite que les variances des estimations visuelles et haptiques. Les variances individuelles VH sont donc comparées aux variances individuelles V et aux variances individuelles H. Pour rappel, l'analyse de variance réalisée sur les écarts-types montrait une différence importante entre les écarts-types visuels et visuo-haptiques d'une part et les écarts-types haptiques d'autre part, et que les écarts-types visuels et visuo-haptiques ne différaient pas significativement.

Les différences entre les variances individuelles haptiques et les variances individuelles visuo-haptiques sont toujours positives ; les différences varient entre $0,18^{02}$ et $22,51^{02}$. Les différences entre les variances individuelles visuelles et les variances individuelles visuo-haptiques sont dans dix sept cas sur vingt et un positives ; les différences varient entre $-1,02^{02}$ et $0,77^{02}$.

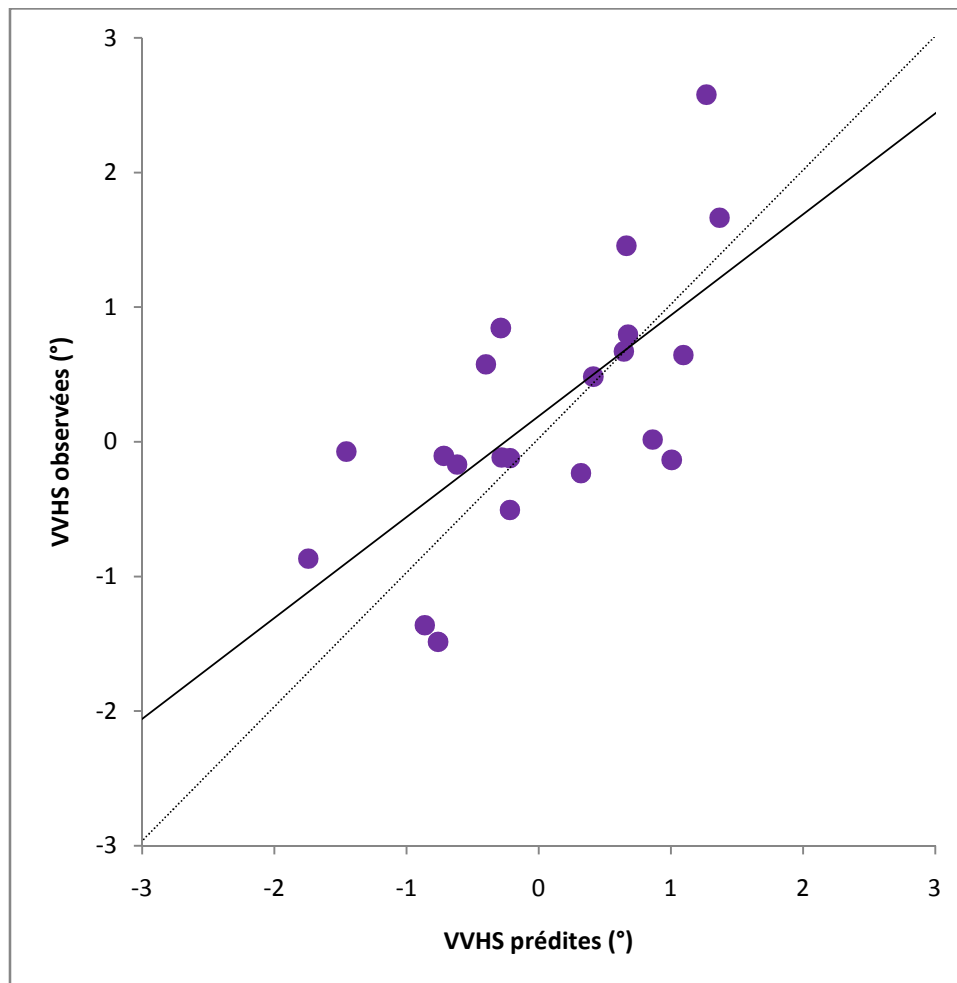


Figure 2.5 : Corrélation entre les VVHS observées en fonctions des VVHS prédites (la ligne noire représente la droite de corrélation linéaire alors que la ligne en pointillés représente la droite d'équation $y = x$).

Estimation des variances théoriques

A partir des variances des estimations individuelles visuelles et haptique, il est possible de donner une mesure théorique des variances visuo-haptique individuelles (équation 4 de la partie 2.4. de la partie introductive). Ces valeurs théoriques sont calculées et comparées à celles observées chez les participants. Une analyse rapide montre que les valeurs théoriques et les valeurs observées sont proches : les différences absolues entre ces deux valeurs sont comprises entre $0,00^{\circ 2}$ et $1,02^{\circ 2}$. L'équation de la droite de corrélation entre les valeurs prédites et observées est $y = 0,07 x + 0,13$. La corrélation n'est pas significative ($r = 0,10$, $p = 0,66$).

Discussion

Le premier but de cette étude était d'apporter des éléments de comparaisons directes des différentes verticales subjectives évaluées généralement de manière isolée. Les VS visuelles, haptiques et visuo-haptiques ont été évaluées chez un groupe de participants sains avec un matériel identique et une procédure la plus semblable possible pendant les trois évaluations.

Dans la modalité visuelle, les performances sont en moyenne proches de la verticale gravitaire ($0,01^\circ$) pour les participants sains. Ce résultat confirme les données d'autres études (Mann, 1952 ; Witkin et Asch, 1948b). La variabilité des performances est faible ce qui indique une bonne précision et une bonne faisabilité de la tâche.

Dans la modalité visuo-haptique, les performances sont en moyenne proches de la verticale gravitaire ($0,04^\circ$) pour les participants sains. Ces résultats confirment les résultats des études de Saj *et al.* (2005a, 2005b, 2005c) bien que les populations étudiées soient différentes dans cette étude et dans les leurs. En effet, les participants de cette étude sont plus jeunes (environ 24 ans) alors que les participants sains des études de Saj *et al.* sont les contrôles des patients cérébro-lésés et sont en moyenne plus âgés (49,2 ans dans l'étude de 2005a, 51,2 ans dans l'étude de 2005b et 61,0 dans l'étude de 2005c). La variabilité des performances est également faible ce qui indique une bonne précision et une bonne faisabilité de la tâche. Par ailleurs, la variabilité est globalement plus faible dans cette modalité que dans les modalités visuelles et haptiques. Ce résultat suggère donc que l'intégration des informations visuelles et haptiques se fasse en faveur d'une diminution de la variabilité des performances combinées dans la tâche de perception de la verticale chez les participants sains jeunes.

Dans la modalité haptique, les performances diffèrent de la verticale gravitaire ($3,12^\circ$) pour les participants sains. Ce résultat n'est pas étonnant puisque les normes des verticales subjectives de Pérennou *et al.* (2008) estiment qu'une déviation de $\pm 4,5^\circ$ dans la modalité haptique est admise alors que les normes dans la modalité visuelle sont de $\pm 2,5^\circ$ chez les participants sains. Par ailleurs,

la modalité haptique, de part sa spécificité d'exploration, ne semble pas spécialisée dans les traitements spatiaux (Lederman et Klatzky, 1993). De plus, les performances dans la modalité haptique diffèrent fortement en fonction de la position initiale de la barre, c'est-à-dire que la verticale subjective haptique est déviée dans le sens anti-horaire par rapport à la moyenne des évaluations lorsque la position initiale de la barre est anti-horaire (-45° ou $-22,5^\circ$) et déviée dans le sens horaire quand la position initiale de la barre est horaire (45° ou $22,5^\circ$). Cet effet des positions initiales a déjà été discuté (Hoppenbrouwers *et al.*, 2004). Dans leur étude, les participants sains doivent ramener une barre à la verticale (VVS) alors qu'elle est initialement inclinée à $\pm 5^\circ$ et à $\pm 20^\circ$ et que les participants ont la tête inclinée à $\pm 20^\circ$ et à $\pm 50^\circ$. Leurs résultats montrent que dans les conditions parallèles (tête et barre inclinées dans le même sens) la VVS est proche de la verticale gravitaire alors que dans les conditions non-parallèles, la VVS est déviée dans le sens opposée à l'inclinaison de la tête (effet E). Les auteurs, en se basant sur la sensibilité du système visuel pour les orientations alignées avec l'axe de la tête et du corps, font l'hypothèse d'une reconnaissance automatique de l'orientation initiale de la barre dans la condition parallèle. Cette paterne de reconnaissance, associée à des informations vestibulaires corrélées permettraient une perception de la verticale normale. Dans la condition non-parallèle, l'absence de corrélation entre les informations vestibulaires et la reconnaissance de l'orientation initiale de la barre provoquerait les déviations de la perception de la verticale observées.

Nos résultats montrent cependant que l'effet de la position initiale est surtout retrouvé dans la modalité haptique. Il peut cependant être envisagé que la modalité visuelle est moins sensible aux positions initiales grâce entre autre aux neurones occipitaux spécialisés dans la perception de la verticale (Li *et al.*, 2003). Ainsi, les performances dans la modalité visuelle sont proches de la verticale gravitaire et sont peu influencées par les positions de départ. Dans la modalité visuo-haptique, la modalité visuelle permettrait de réaliser des performances équivalentes. Par contre, en absence d'information visuelle, le système haptique ne permettrait pas de réaliser des compétences

constantes et proches de la verticale gravitaire. Deux hypothèses peuvent être posées : la première concerne les systèmes de référence. En effet, la perception de la verticale est une tâche allo-centrée car elle fait référence à une constante environnementale alors que le système haptique est un système égo-centré, faisant référence au corps propre. On peut donc supposer que la modalité haptique est peu adaptée à la perception de la verticale gravitaire puisqu'ils font appel à deux systèmes de référence différents.

Une deuxième hypothèse concerne la pauvreté de l'exploration haptique dans la tâche : la modalité utilisée ici ne permet pas d'exploration de la barre et le système ne récupère de l'information haptique que par le centre de la barre. Ces deux hypothèses vont dans le sens des conclusions de Lederman et Klatzky (1993) qui font la démonstration que cette modalité n'est pas spécifique de la perception spatiale.

Le second but de cette étude était de valider l'utilisation du modèle d'intégration des informations sensorielles proposé par Ernst et Banks (2002) dans l'étude de la perception de la verticale gravitaire chez des participants sains. Le modèle apporte une bonne prédiction des performances visuo-haptiques

La modalité visuelle donne une mesure précise de la perception de la verticale (proche de 0°) chez les participants sains. Par contre, la modalité haptique en donne une mesure systématiquement déviée. De plus, les performances en modalité haptique dépendent systématiquement des positions initiales de la barre.

Dans la modalité visuo-haptique, il semble que les participants sains prennent davantage en considération les informations visuelles, tant les VVS et les VVHS sont proches. L'utilisation du modèle confirme cette observation et la quantifie : les participants sains utilisent l'information visuelle à environ 90% dans les ajustements visuo-haptiques.

La corrélation entre les prédictions du modèle et les performances observées dans la modalité VH

est forte ce qui valide l'utilisation du modèle dans la perception de la verticale. Les participants sains utilisent préférentiellement les informations visuelles dans une condition optimale mais utilisent néanmoins l'information haptique après que le système l'ait pondéré en fonction de sa précision en relation avec la précision des informations visuelles. Dans l'étude qui suit, l'utilisation d'un cadre visuelle apportera une imprécision des informations visuelles, alors que les informations haptiques resteront inchangées. Si le système nerveux central intègre les informations sensorielles de manière optimale dans la perception de la verticale, alors, les résultats devraient montrer une pondération différentes des informations visuelles et haptiques, mais avec tout de même une prédiction préservée des performances visuo-haptiques par le modèle.

Etude III : Effet d'une perturbation visuelle sur l'intégration multisensorielle pour la perception de la verticale chez les participants sains

Résumé

La perception de la verticale gravitaire peut être évaluée par le biais d'une modalité mélangeant les informations visuelles et haptiques. Dans cette modalité, les informations visuelles et haptiques sont combinées selon une pondération fixée en fonction de la précision relative de ces informations sensorielles. Cette intégration multisensorielle est apparentée au maximum de vraisemblance qui postule que l'intégration des informations sensorielles redondantes pour évaluer une propriété est réalisée dans le but de produire un minimum de variabilité. Dans des conditions optimales, les informations visuelles sont utilisées préférentiellement car c'est un signal spécialisé dans le traitement des informations spatiales. Le but de cette étude est de vérifier si les participants sains moduleront la pondération des informations sensorielles à la base de l'intégration multisensorielle si une altération des informations visuelles est produite. Des participants sains doivent ajuster avec la main droite une barre avec la verticale gravitaire dans les trois modalités. Un cadre visuel incliné est posé autour de la barre à ajuster. Les résultats montrent que la dépendance aux informations visuelles est présente dans des proportions égales dans les modalités visuelles et visuo-haptiques. Le poids des informations visuelles est moins important chez les dépendants. Dans ce groupe, les prédictions de la VVHS sont corrélées avec les estimations observées de la VVHS. Les données suggèrent donc que le système nerveux central pondère les informations sensorielles en fonction de leur précision et qu'il est capable de moduler rapidement cette pondération quand le système visuel devient moins précis.

Introduction

Dans l'étude précédente, des participants sains devaient ajuster une barre avec la verticale gravitaire dans trois modalités différentes dans l'obscurité. Dans la modalité visuelle (VVS), les participants voyaient la barre et indiquaient verbalement à l'expérimentateur comment déplacer la barre pour l'aligner avec la verticale gravitaire. Dans la modalité haptique (VHS), leur main droite était placée au centre de la barre et les participants devaient ramener la barre à la verticale dans cette condition. Dans la modalité visuo-haptique (VVHS), les participants voyaient la barre et la déplaçaient grâce à leur main droite pour la ramener à la verticale. Dans cette modalité, un modèle d'intégration des informations sensorielles a été appliqué : ce modèle postule que dans une condition où des informations sensorielles sont redondantes, les participants les combinent selon une pondération fixée en fonction de la précision relative de ces informations sensorielles (Ernst et Banks, 2002). Ce modèle est apparenté au maximum de vraisemblance et propose que les participants intègrent les informations sensorielles dans le but de minimiser la variabilité des estimations multisensorielles. Il a été validé dans la perception de la taille des objets (Ernst et Banks, 2002), de leur orientation (Gori *et al*, 2008). Les résultats de notre étude suggèrent que les jeunes participants sains intègrent les informations visuelles et haptique afin de réduire la variabilité de la VVHS. Les informations visuelles sont néanmoins plus importantes dans cette estimation multisensorielle, même si les informations haptiques sont intégrées.

Cependant, dans cette étude, les conditions sont optimales, c'est-à-dire que les participants sont assis avec la tête droite sans élément perturbateur, ce qui favorise la prise en compte des informations visuelles. Pour valider l'utilisation du modèle dans la perception de la verticale, il est important de vérifier qu'en cas d'altération des informations visuelles, les participants seront capables d'ajuster la pondération relative de ces informations afin d'intégrer les informations visuelles et haptiques avec le même critère d'optimalité basé sur la précision des estimations visuo-haptiques.

Dans la perception de la verticale, il est facile d'entraîner une déviation de la VVS en utilisant un cadre visuel incliné devant la barre à ajuster. Cet effet cadre a d'abord été évalué dans une condition où 49 participants sains devaient aligner une barre avec la position perçue de leur corps alors qu'ils étaient face à une pièce inclinée de 30°. Les résultats montrent une déviation d'environ 21° par rapport à la verticale gravitaire dans la direction de l'axe d'inclinaison de la scène (Asch et Witkin, 1948a). Ces auteurs distinguent deux styles perceptifs. Dans le premier, les participants ne sont pas influencés par la présence du cadre. Leurs estimations ne varient donc pas ou peu entre une condition avec cadre et une condition sans cadre. Ces participants sont dits indépendants à l'égard du champ. Au contraire, les autres participants sont dépendants à l'égard du champ, c'est-à-dire qu'en présence d'un cadre, leurs estimations seront déviées dans le sens du cadre. Le critère de dépendance communément retenu est la présence d'une déviation moyenne de plus de 5° entre la VVS obtenue sans cadre et la VVS obtenue avec les cadres à $\pm 18^\circ$.

Par la suite, des études ont montré que la simple présence d'un cadre incliné pouvait entraîner des effets similaires (Asch et Witkin, 1948b). Elles ont donné lieu à un test clinique appelé le *rod-and-frame test* ou test du cadre et de la baguette (Oltman, 1968). Différents auteurs ont rapidement souligné la présence d'effets plus ou moins importants en fonction de l'inclinaison du cadre visuel. Ces auteurs décrivent une courbe dont les effets les plus importants sont observés pour 15° et 30°. Les déviations passaient de 0,04° à 1,37° quand le cadre passait de 0° à 15° et les déviations passaient de 0,04° à -0,56° quand le cadre passait de 0° à 30° (Beh *et al.*, 1971). Ces auteurs proposent que face à un cadre, les participants fournissent une mesure de la verticale subjective voisine de la droite du cadre la plus proche. Ces droites sont formées par les axes verticaux et horizontaux et par les deux diagonales, ce qui explique la variabilité des effets observés en fonction de l'inclinaison du cadre (voir la figure 1.61 de Beh *et al.*, 1971).

En plus de dévier les performances vers le cadre, la présence d'un cadre provoque une erreur variable plus importante qu'en absence de cadre (Luyat *et al.*, 1997). Dans leur étude, 22

participants sains dépendants à l'égard du champ et 22 participants sains indépendants devaient aligner une barre lumineuse avec la verticale gravitaire en absence et en présence d'un cadre lumineux incliné à 28° dans la position assise statique (expérience 2). Les résultats montrent une déviation de $1,08^\circ \pm 0,50^\circ$ pour les indépendants qui passe à $1,57^\circ \pm 1,08^\circ$ en présence du cadre. Pour les dépendants, la déviation passe de $1,38^\circ \pm 0,89^\circ$ sans cadre à $5,70^\circ \pm 1,98^\circ$ avec le cadre. L'erreur variable est à peu près deux fois plus importante en présence du cadre, même chez les participants indépendants. Le cadre provoque une incertitude, probablement à cause du conflit provoqué entre les informations vestibulaires inchangées et les informations visuelles perturbées. L'objectif de ce travail est de vérifier si l'intégration multisensorielle, effective chez les participants sains jeunes dans la perception de la verticale en absence de dégradation des informations visuelles, reste effective en présence d'une dégradation de ces informations sensorielles. En présence d'un cadre visuelle perturbant, l'importance des informations visuelles doit être diminuée en raison de l'augmentation de son erreur variable. Cependant, les participants doivent rester capable de moduler la pondération avec laquelle les informations visuelles et haptiques sont intégrées afin de préserver le critère d'optimalité basé sur la précision des estimations visuo-haptique.

Méthodes

Participants

Dix participants sains droitiers ont participé à l'étude (moyenne d'âge 45 ± 19 ans). Deux groupes d'âge peuvent être distincts : un groupe de participants jeunes (23 ± 1 ans) et un groupe de participants plus âgés (60 ± 3 ans). Ils sont tous droitiers (questionnaire de latéralité d'Edinburg). Ils ont par ailleurs signé un formulaire de consentement éclairé. Aucun ne souffre d'amputation du champ visuel ou de maladie neurologique et ils ont tous une vue normale ou corrigée.

Matériel

Voir la partie «Méthodologie générale» au début de la partie «Contributions expérimentales»

Dans cette étude, l'effet cadre est évalué. Un cadre blanc (26 cm de côté) éclairé par une lumière noire est donc positionné autour du disque et de la barre lumineuse à ajuster. Ce cadre peut être tourné autour de son centre (figure 2.6).

Procédure

Les participants sont placés sur le lit médicalisé à une distance de 40 cm environ (en fonction de la taille du bras, l'objectif étant de ne pas avoir le bras tendu) et aligné avec le visage. Leur tête est maintenue au moyen d'une sangle. La consigne est d'aligner la barre avec la verticale gravitaire en utilisant les informations visuelles (V), haptiques (H) ou les deux (VH). Dans la modalité visuelle (VVS), les participants voient la barre mais ne peuvent la toucher : ils indiquent oralement à l'expérimentateur comment placer la barre pour l'aligner avec la verticale gravitaire. Ils indiquent si le haut de la barre doit tourner vers la droite ou la gauche. Dans la modalité haptique (VHS), les participants ont les yeux bandés. Leur main droite est placée par l'expérimentateur au centre de la barre éteinte. Celle-ci est ramenée à la verticale par le sujet. Dans la modalité combinée (VVHS), la barre allumée est ramenée à la verticale par le sujet par l'utilisation de sa main droite. Lors de la consigne, l'importance de la précision des performances est citée. Le temps de réalisation n'est pas pris en compte, mais les ajustements sont généralement rapides, n'excédant pas quelques secondes. Le cadre lumineux est utilisé pour les VVS et VVHS. Il est incliné à $\pm 28^\circ$, à $\pm 18^\circ$ et à 0° .

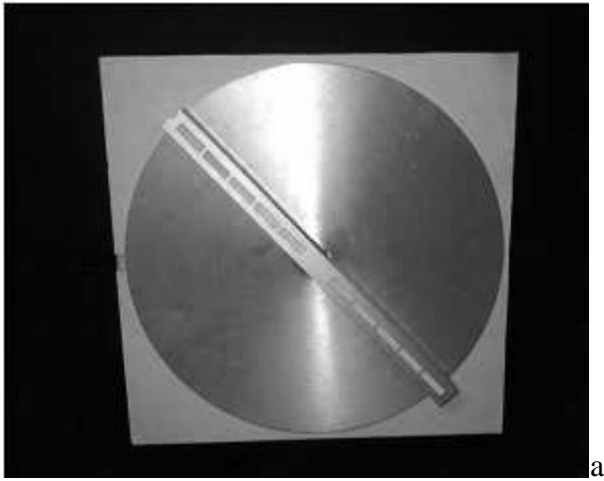
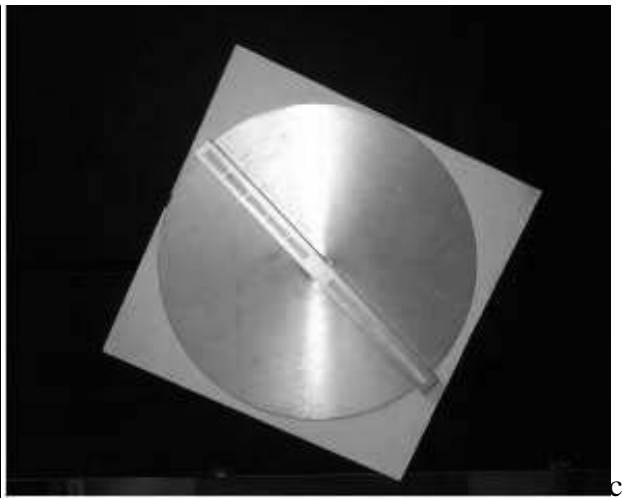
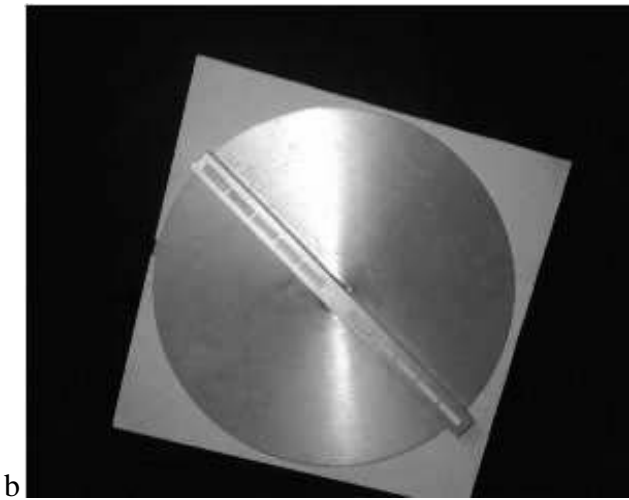


Figure 2.6 : Photos du dispositif d'évaluation de la verticale subjective en présence d'un cadre à 0° (a), d'un cadre incliné à 18° (b) et à 28° (c) dans le sens horaire.



Chaque sujet passe les 3 modalités (Modalité $M = \text{VVS, VHS et VVHS}$). Le disque est toujours placé face au sujet, mais la barre est initialement inclinée (Barre $B = -45^\circ$ et 45°). Par convention, un signe négatif correspond à une orientation anti-horaire. Chaque participant passe par les différentes inclinaisons du cadre (Cadre $C = -28^\circ, -18^\circ, 0^\circ, +18^\circ, +28^\circ$). Chaque participant réalise 2 ajustements (4 ajustement dans la modalité haptique) par position initiale de la barre pour un total de 48 ajustements ($1M*2B*4R$ et $2M*5C*2B*2R$).

Chaque condition est contre balancée. Les données recueillies sont la déviation de la barre par rapport à la verticale gravitaire en degrés (à $0,1^\circ$ près).

Résultats

Evaluation de l'effet cadre

L'effet cadre est évalué en mesurant la distance entre les estimations moyennes des VVS et VVHS avec les cadres à $\pm 18^\circ$. L'effet cadre est évalué en comparant les performances avec un cadre incliné à -18° et à $+18^\circ$. Une différence de plus de 3 degrés est considérée comme un signe de dépendance visuelle. Une corrélation est mesurée entre les VVS et VVHS afin de vérifier si la dépendance aux informations visuelles est également observée dans la modalité visuo-haptique. Les résultats montrent une corrélation significative entre ces deux mesures de dépendance ($y = 0,89x + 0,11$; $r = 0,86$; figure 2.7). Par ailleurs, ces données nous permettent de distinguer deux groupes de participants en fonction de leur degré de dépendance à l'égard du champ. Notre échantillon est donc constitué de 4 participants dépendants au cadre (deux sont jeunes et sont situés en dessous et sur la droite et deux sont plus âgés et sont situés au dessus de la droite) et 6 participants indépendants (deux sont jeunes et quatre sont plus âgés).

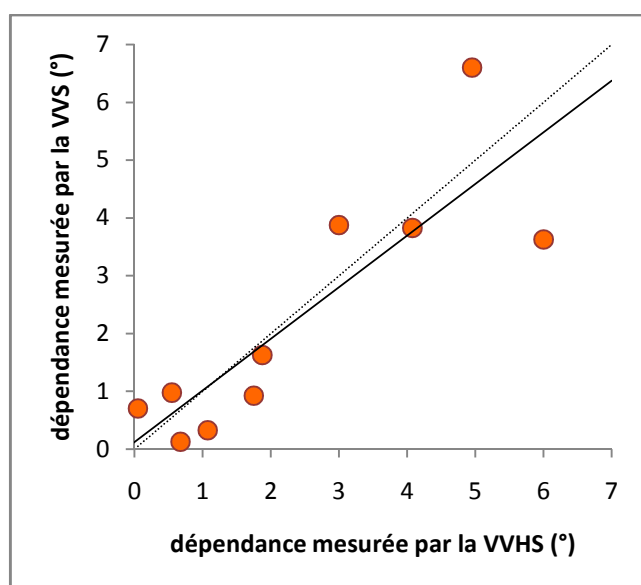


Figure 2.7 ; Corrélation entre le niveau de dépendance mesuré par la VVS en fonction du niveau de dépendance mesuré par la VVHS (la ligne noire représente la droite de corrélation linéaire alors que la ligne en pointillés représente la droite d'équation $y = x$).

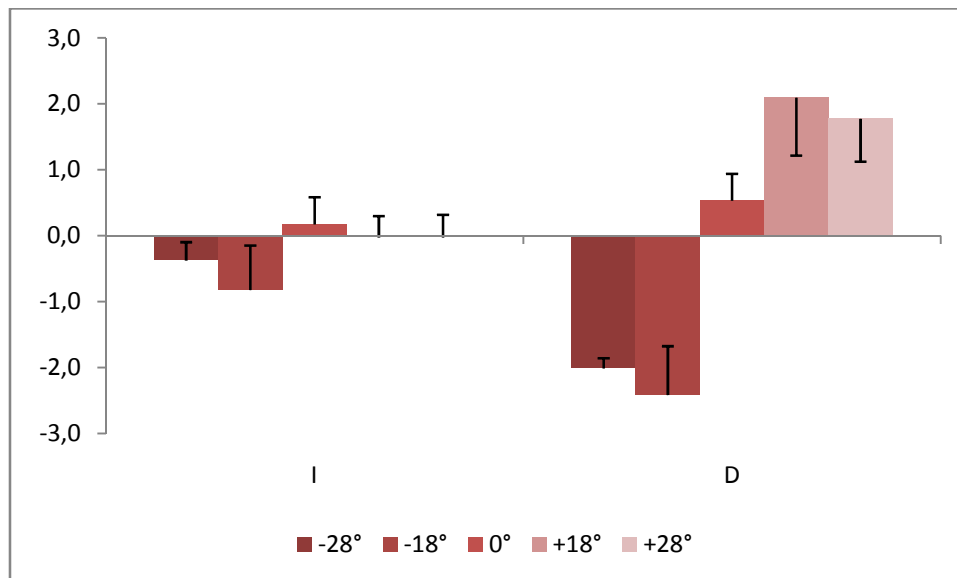


Figure 2.8 ; Verticales subjectives visuelles (erreurs constantes) en fonction du groupe et de la position du cadre.

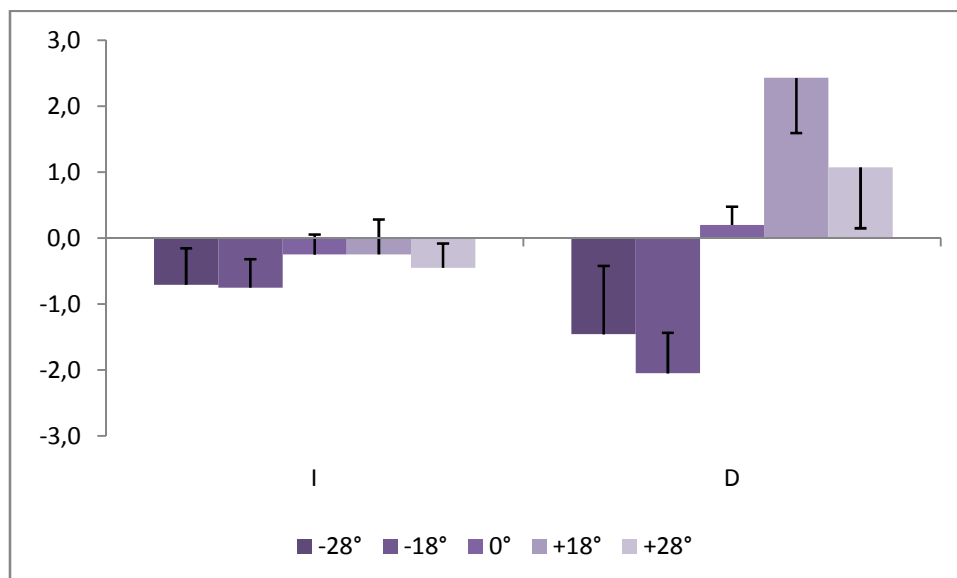


Figure 2.9 ; Verticales subjectives visuo-haptiques (erreurs constantes) en fonction du groupe et de la position du cadre.

Evaluation des déviations des verticales subjectives

Une première ANOVA est réalisée sur les notes brutes obtenues dans la modalité haptique en prenant en compte le groupe de participants et la position initiale de la barre. Aucune variable n'a d'effet significatif (groupe : $F_{1,8} = 3,39$; $p = 0,11$; barre : $F_{1,8} = 1,74$; $p = 0,22$; interaction : $F_{1,8} = 2,59$; $p = 0,15$). En moyenne, la VHS est évalué à $-0,6^\circ \pm 2,86^\circ$.

Une seconde ANOVA est réalisée sur les modalités VVS et VVHS en prenant en compte le groupe

de participants, la modalité, la position du cadre et la position initiale de la barre (figures 2.8 et 2.9). Les résultats ne montrent pas d'effet de la modalité ($F_{1,8} = 0,77$; $p = 0,40$). Par contre, l'interaction entre le groupe et le cadre est significatif ($F_{4,32} = 29,75$; $p < 0,01$). Pour les indépendants, la VVS et la VVHS ne diffèrent pas en fonction de la position du cadre (respectivement $p > 0,18$ et $p > 0,47$) alors que pour les dépendants, la VVS et la VVHS diffèrent en fonction de la position du cadre : les performances pour les cadres inclinés dans le sens antihoraire ne diffèrent pas (respectivement pour VVS et VVHS, $p = 0,51$ et $p = 0,24$) et les performances pour les cadres inclinés dans le sens horaire ne diffèrent pas pour la VVS ($p = 0,24$). Les autres comparaisons deux à deux sont significativement différentes ($p < 0,05$).

Evaluation du poids théorique des informations visuelles

A partir des équations (1) et (2) citées précédemment, les poids théoriques sont calculés pour chaque sujet et chaque position du cadre. L'ANOVA réalisée sur les poids du visuel (figure 2.9) en fonction du groupe et du cadre montre un effet significatif du groupe ($F_{1,8} = 22,93$; $p < 0,01$), du cadre ($F_{4,32} = 3,83$; $p = 0,01$) et une interaction significative ($F_{4,32} = 4,36$; $p < 0,01$).

Par ailleurs, en présence du cadre à 0° , la corrélation entre le poids du visuel et le niveau de dépendance est faible ($y = -0,01 x + 0,89$; $r = 0,16$; figure 2.10). Par contre, la corrélation est significative en présence des cadres à $\pm 28^\circ$ (figure 2.11 : $y = -0,04 x + 0,97$; $r = 0,66$ pour le cadre à -28° et $y = -0,02 x + 0,92$; $r = 0,32$ pour le cadre à $+28^\circ$) et à $\pm 18^\circ$ (figure 2.12 : $y = -0,04 x + 0,96$; $r = 0,55$ pour le cadre à -18° et $y = -0,09 x + 0,94$; $r = 0,62$ pour le cadre à $+18^\circ$).

Estimation des moyennes théoriques

A partir du poids des estimations individuelles visuelles et haptiques et des moyennes des estimations individuelles visuelles et haptiques, les valeurs théoriques des estimations visuo-haptiques sont calculées (équation 3). Les résultats montrent que pour les participants indépendants,

les VVHS estimées sont proches des VVHS observées, avec une corrélation significative (figure 2.12 : $y = 0,60 x + 0,31$; $r = 0,62$). La corrélation est également significative pour les participants dépendants (figure 2.13 : $y = 0,91 x - 0,13$; $r = 0,83$).

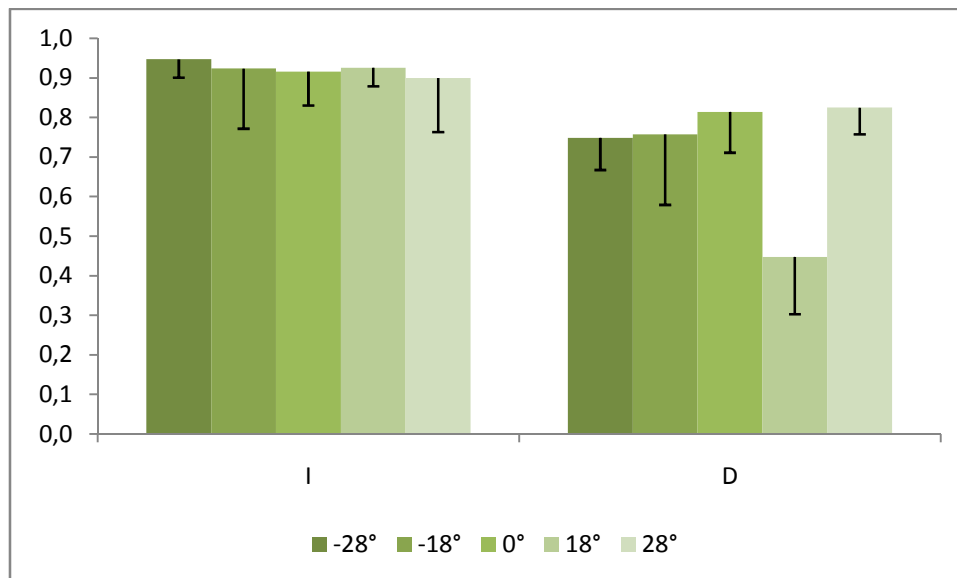


Figure 2.10 : Moyennes des poids relatifs théoriques des informations visuelles dans la perception visuo-haptique de la verticale en fonction de la position du cadre et du groupe.

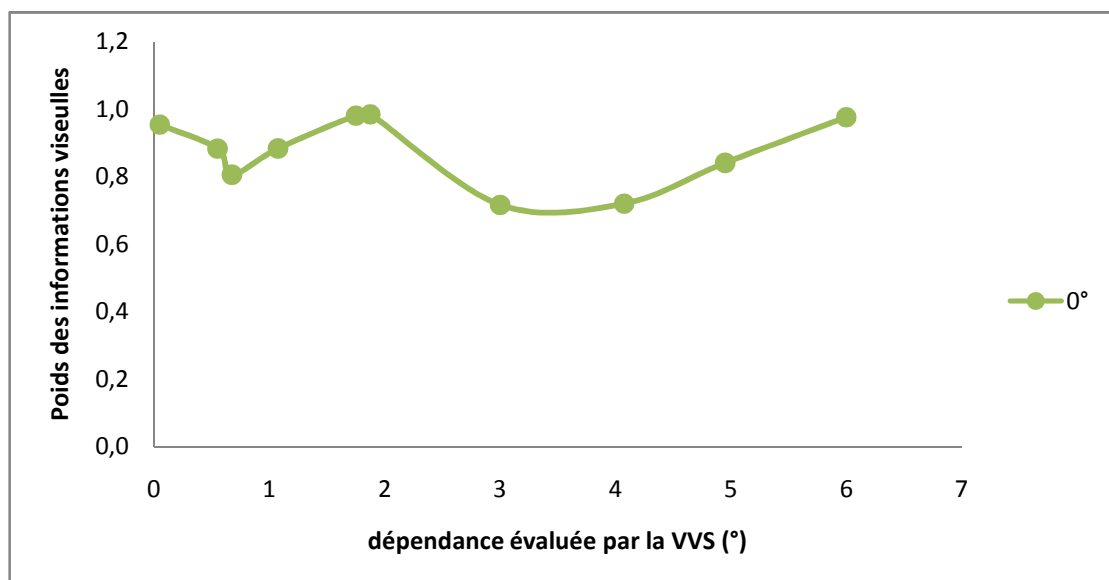


Figure 2.11 : Corrélation entre le poids des informations visuelles et la dépendance visuelle en présence du cadre à 0°.

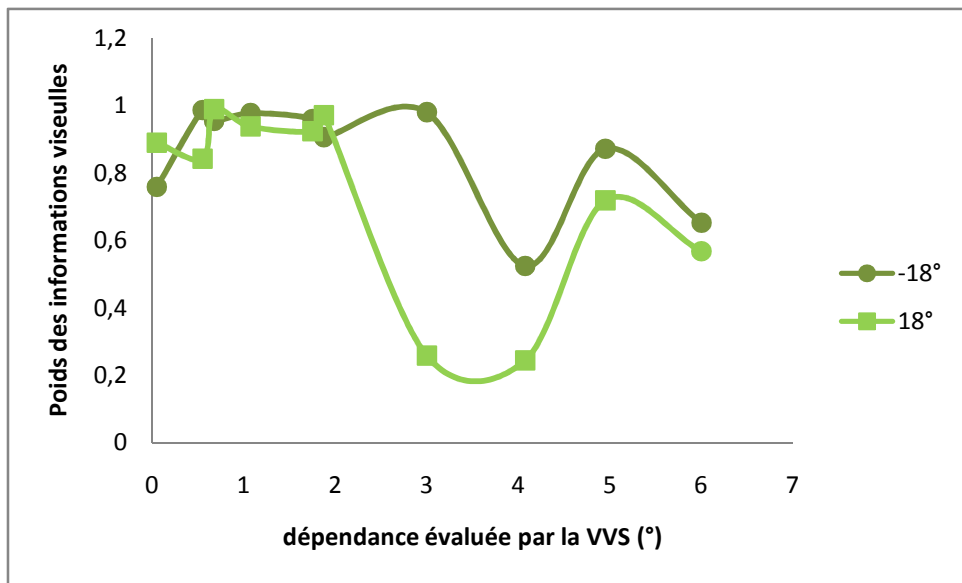


Figure 2.12 : Corrélation entre le poids des informations visuelles et la dépendance visuelle en présence du cadre à $\pm 18^\circ$.

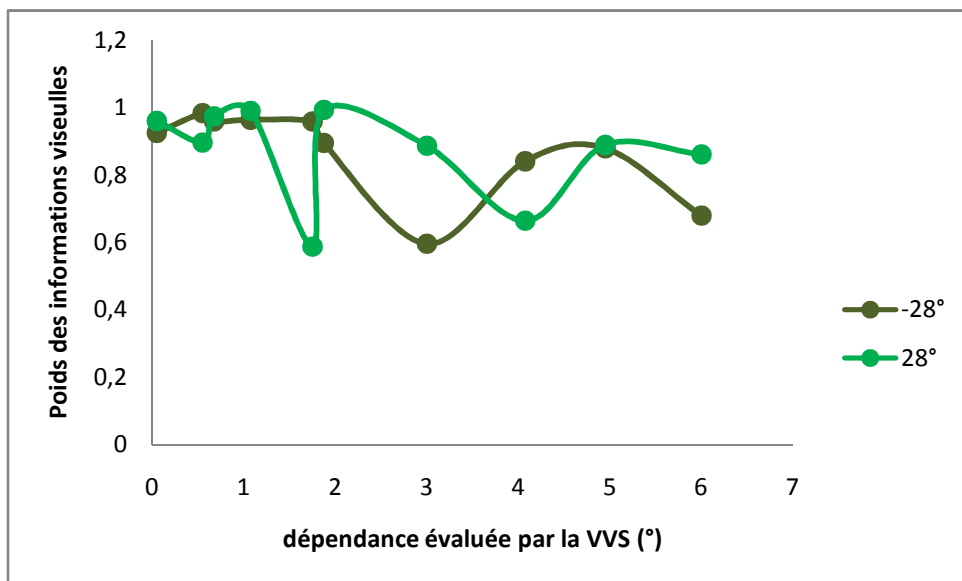


Figure 2.13 : Corrélation entre le poids des informations visuelles et la dépendance visuelle en présence du cadre à $\pm 28^\circ$.

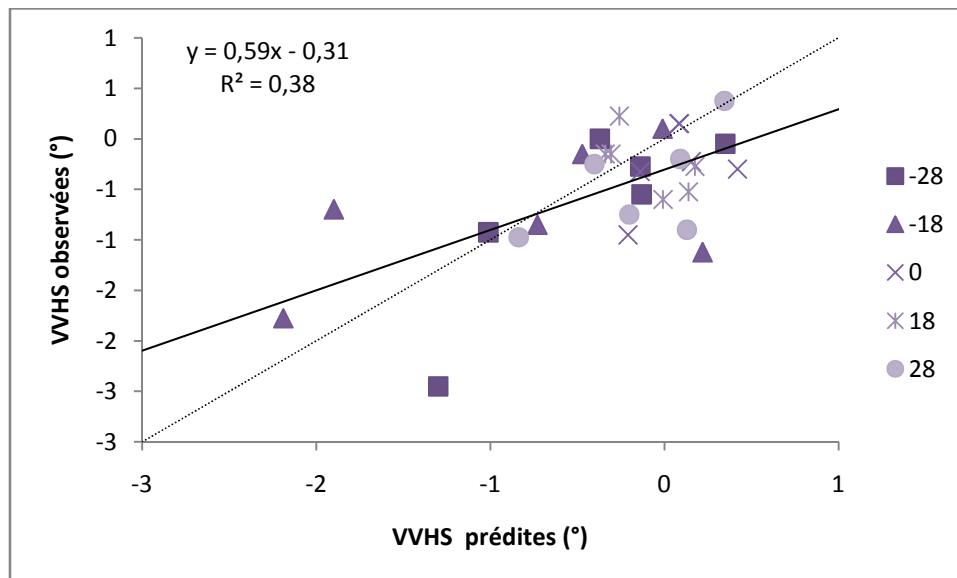


Figure 2.14 : Corrélation entre les VVHS observées en fonction des VVHS prédites pour les participants indépendants en fonction de la position du cadre (la ligne noire représente la droite de corrélation linéaire alors que la ligne en pointillés représente la droite d'équation $y = x$).

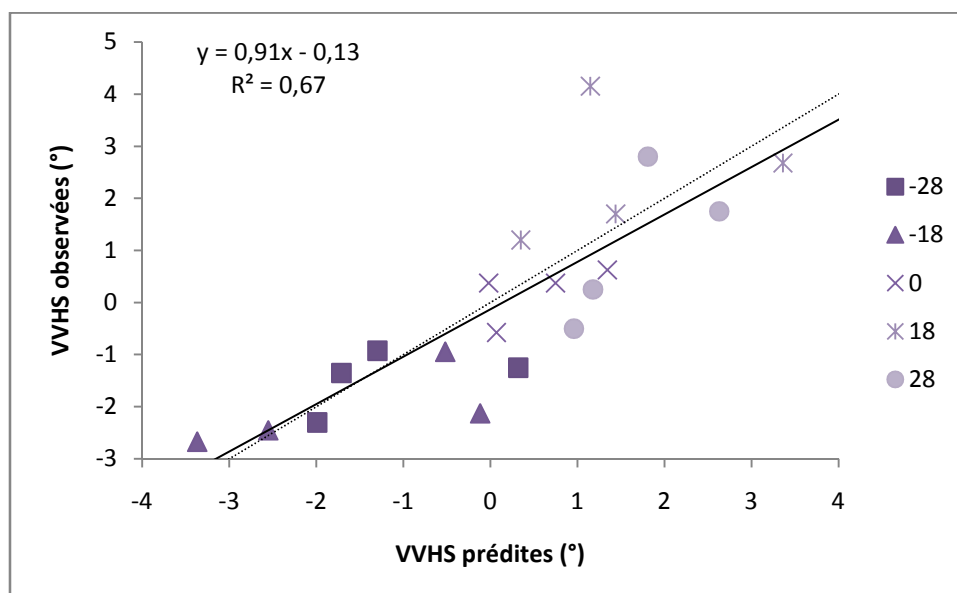


Figure 2.15 : Corrélation entre les VVHS observées en fonction des VVHS prédites pour les participants dépendants en fonction de la position du cadre (la ligne noire représente la droite de corrélation linéaire alors que la ligne en pointillés représente la droite d'équation $y = x$).

Comparaison des erreurs variables

La différence entre les erreurs variables a été mesurée entre les VVS et VVHS d'une part et entre les VHS et VVHS d'autre part, en fonction du groupe et de l'inclinaison du cadre (figure 2.16). Les résultats montrent en moyenne des différences positives (sauf dans un cas chez les indépendants).

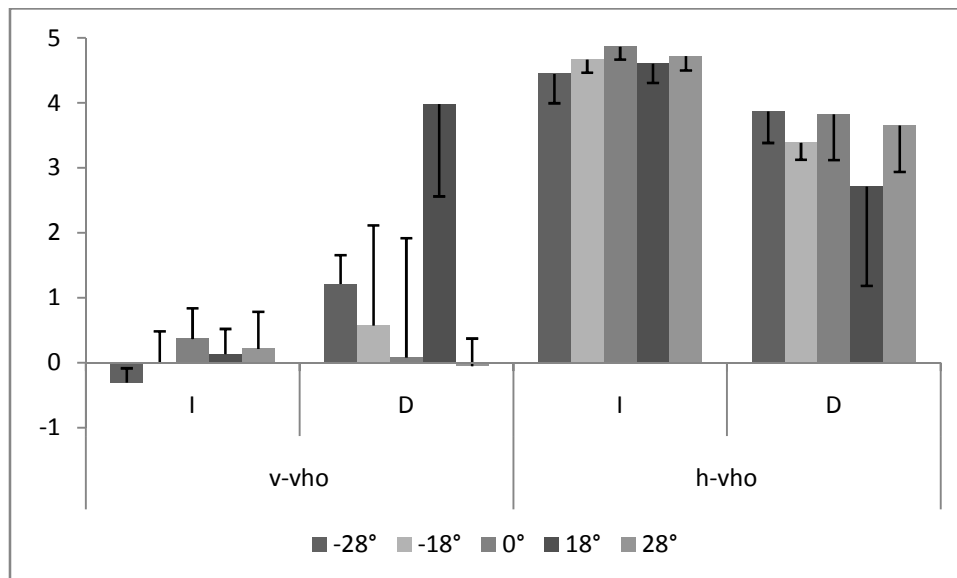


Figure 2.16 : Différence entre les erreurs variables des verticales visuelles et multisensorielles et entre les erreurs variables des verticales haptiques et multisensorielles en fonction des groupes et des cadres.

Discussion

Le but de l'étude était de vérifier si la perception de la verticale dans la modalité visuo-haptique intégrait les informations visuelles et haptiques de manière optimale, c'est-à-dire en pondérant les informations disponibles en fonction de leur précision, afin de réduire la variabilité de l'estimation multisensorielle. Cette vérification est réalisée en présence d'un conflit entre les informations haptiques non biaisées et les informations visuelles perturbées par la présence d'un cadre plus ou moins incliné. Parmi les participants sains, 4 présentent une dépendance aux informations visuelles. La VHS est en moyenne précise et ne dépend pas du groupe alors que les VVS et VVHS dépendent du groupe avec une déviation des estimations dans le sens du cadre pour les dépendants. Globalement le poids des informations visuelles est plus faible pour les dépendants et cela d'autant plus que le niveau de dépendance est important. Néanmoins, les performances prédites par le modèle sont proches de celles observées pour les deux groupes. Enfin, la variance est plus faible dans la VVHS en comparaison aux VVS et VHS pour les deux groupes.

Le nombre de participants dépendants dans cette étude confirme les résultats d'autres études

évaluant la dépendance aux informations visuelles. En effet, il est admis qu'environ 30% de la population normale présente une dépendance visuelle (Crémieux et Mesure, 1994). Dans notre étude 40% des participants présentent une dépendance visuelle, et en raison de la taille de notre échantillon, la différence ne semble pas différente. Cette information est importante puisqu'elle suggère que notre matériel ainsi que notre méthode d'évaluation provoque bien un conflit entre les informations vestibulaires et proprioceptives normales d'une part et les informations visuelles perturbées d'autre part. Le nombre de participants dépendants ne diffèrent pas selon le groupe d'âge, avec deux participants sur quatre dépendants dans le groupe de jeunes et deux sur six dans le groupe de participants plus âgés. Pourtant la littérature met en évidence une augmentation de la proportion de participants dépendants avec l'âge, certainement en lien avec la réduction des sensibilités proprioceptives et vestibulaires avec l'âge (Lord et Webster, 1990). Cependant, en raison du faible nombre de participants dans notre échantillon, aucune contradiction ne peut être apportée. Enfin, nos résultats montrent pour la première fois que la dépendance aux informations visuelles est également observée dans la modalité visuo-haptique. Cette modalité mesure donc bien la verticale subjective avec des propriétés proches de celles observées dans la modalité visuelle.

La VHS est proche de la verticale gravitaire dans cette étude. Ce résultat va à l'encontre des autres mesures de la VHS dans ce travail de thèse. En effet, dans l'étude 1, les participants sains contrôles des patients cérébro-lésés avaient une déviation anti-horaire, alors que les participants sains jeunes de l'étude 2 présentaient une déviation de la VHS dans le sens horaire. Cependant, dans cette étude, le groupe de participant n'est pas autant contrôlé que dans les études 1 et 2. En effet, cette étude à était pensait pour évaluer un certain nombre de participants sains jeunes puis dans un second temps des participants sains plus âgés pour contrôler les performances de participants cérébro-lésés. En raison de problème matériel, le nombre de données exploitables à été plus faible que prévue initialement, créant ainsi un groupe de participants d'âge différent. Notre échantillon compte quatre participants jeunes et six participants plus âgés. Leurs performances sont globalement anti-horaires

La dépendance a un effet sur le poids des informations visuelles. En effet, en présence d'un cadre visuel, les participants dépendants présentent une déviation de l'erreur constante dans le sens du cadre, mais également une augmentation de l'erreur variable (Luyat *et al.*, 1997). Cette diminution de la précision visuelle, relativement à la précision de la modalité haptique qui ne diffère pas dans l'étude, entraîne donc une diminution du poids des informations visuelles. Au contraire, les participants peu sensibles à l'inclinaison du cadre ne présentent pas d'augmentation de leurs erreurs variables et le poids des informations visuelles restent important pour toutes les orientations du cadre. Ces indications confirment la modulation de la prise en compte des informations dans un conflit sensorielle en fonction de la précision des informations (Welch et Warren, 1986 ; Ernst et Banks, 2002). En présence du cadre non incliné, le niveau de dépendance n'est pas corrélé à une diminution du poids des informations visuelles car dans cette position, le cadre ne provoque pas de conflit sensoriel et donc pas d'augmentation de l'erreur variable pour les participants dépendants. Au contraire, en présence d'une déviation du cadre, le niveau de dépendance est corrélé avec la diminution du poids des informations visuelle. Cette dépendance aux informations visuelles est donc bien un point important pour l'évaluation du modèle que nous testons ici, car nous cherchons en particulier à vérifier que pour un même participant, si une information (visuelle) précise devient bruitée, alors le système nerveux central réévaluera l'importance qu'il accorde aux informations haptiques initialement moins précises (Ernst et Banks, 2002). Cette hypothèse est donc validée par la forte corrélation entre les mesures de la verticale subjective visuo-haptique estimées et observées. Globalement, pour les participants indépendants, l'information visuelle est peu altérée et les estimations calculées par le modèle sont proches des observations, comme dans l'étude 2 de ce travail. Par contre quand les informations visuelles sont altérées alors le système nerveux central donne aux informations haptiques plus d'importance dans l'estimation multimodale, même dans le cas particulier du cadre visuel à $+18^\circ$ qui rend l'information visuelle moins précise que l'information haptique.

Enfin, dans la modalité visuo-haptique, la variance est plus faible que dans les modalités visuelles et haptiques. Le cas des participants indépendants est équivalent à celui des participants de l'étude 2 de ce travail, avec une différence entre les variances visuelle et visuo-haptique proche de zéro en raison de la supériorité de l'information visuelle par rapport aux informations haptiques. Le cas des participants dépendants illustrent bien la modulation de l'intégration des informations visuelles et haptiques car la différence entre les variances visuelle et visuo-haptique est plus importante que chez les indépendants. De manière équivalente, la différence entre les variances haptiques et visuo-haptiques est plus faible que celle des participants indépendants suggérant l'augmentation de la prise en considération de l'information haptique dans l'estimation visuo-haptique. Cependant, on constate que l'information visuelle reste fortement prise en considération.

L'évaluation des participants cérébro-lésés reste à approfondir. En effet, ils montrent une dépendance à l'égard des informations visuelles plus importante que dans la population de participants sains en raison de la perturbation de leurs informations proprioceptives et vestibulaires (Bonan *et al.*, 2006a). L'évaluation de cette population représente une opportunité d'évaluer si les informations visuelles et haptiques sont intégrées au niveau du système nerveux central de la même manière que chez les participants sains mais également de vérifier si la pondération des informations sensorielle est modulée en présence d'une information visuelle perturbée (en présence d'un cadre visuelle). Cette hypothèse est en cours de validation, le nombre de participants cérébro-lésés testés ne permettant pas de réaliser une analyse précise.

Dans l'étude suivante, les performances de patients cérébro-lésés avec ou sans trouble visuel associé ainsi que celles de participants sains et plus âgés seront confrontés aux modèle (MLE).

Etude IV : Effet de l'âge et d'une lésion cérébrale droite sur l'intégration multisensorielle pour la perception de la verticale

La rédaction de cette étude est réalisée à partir de l'article dont la référence est rappelée ci-dessous.

Braem B., Honoré J., Rousseaux M., Saj A., Coello Y. (2014). Visual and haptic integration in visuo-haptic vertical in young and old healthy participants and in brain injury participants with and without spatial deficit. *Clinical Neurophysiology*.

Résumé

La perception multi-modalitaire pose la question de l'intégration sensorielle. Le but de l'étude était de vérifier si la verticale subjective visuo-haptique pouvait être prédite à partir des performances uni-modalitaires, selon un modèle bayésien optimisant la variabilité de l'estimation multi-modalitaire. Les limites du modèle ont été testées en évaluant l'influence de l'âge, de lésions cérébrales ou de troubles visuo-spatiaux. Des participants jeunes et plus âgés, ainsi que des patients porteurs d'une lésion hémisphérique droite, souffrant d'une négligence spatiale ou non, devaient aligner une barre avec la verticale gravitaire dans les modalités visuelle, haptique et visuo-haptique. Les performances en modalité visuo-haptique étaient proches des prédictions du modèle, chez les participants sains comme chez les patients, malgré les différences de verticales subjectives. Chez les patients négligents, la verticale subjective était déviée dans les trois modalités. Chez les patients non négligents et les participants sains, elle n'était déviée que dans la modalité haptique, dans le sens anti-horaire chez les patients non négligents et les adultes sains plus âgés, et dans le sens horaire chez les jeunes adultes sains. Par ailleurs, la variabilité la plus faible était observée dans la modalité visuo-haptique. L'intégration des informations visuelles et haptiques paraît obéir à un modèle bayésien optimisant la variabilité de l'estimation multi-modalitaire, même chez des personnes vieillissantes, souffrant d'atteintes cérébrales ou de troubles visuo-spatiaux. Concernant la perception de la verticale, l'intégration multisensorielle ne semble donc pas dépendre de l'intégrité des aires corticales postérieures droites.

Introduction

Percevoir les propriétés spatiales de notre environnement est essentielle à la régulation de nos interactions avec les objets qui le composent. Certaines de ces propriétés sont perçues par un système sensoriel seulement alors que d'autres propriétés peuvent être perçues par différents systèmes sensoriels (voir Rock et Victor, 1964). Par exemple, la taille d'un objet peut être estimée à partir des informations visuelles uniquement, ou des informations haptiques. Elle peut également être estimée par une combinaison des informations visuelles et haptiques. Dans ce dernier cas, l'utilisation de différentes informations sensorielles soulève la question de l'intégration de ces informations par le système nerveux, d'autant que ces informations ne sont généralement pas équivalentes et possèdent des variabilités différentes.

Au début des années soixante, Rock et Victor (1964) posaient déjà les bases de ce problème en évaluant comment la taille d'un objet était perçue en présence d'informations visuelles et haptiques conflictuelles. Dans cette première étude, les participants observaient un objet à travers un prisme de sorte qu'il apparaissait visuellement comme un rectangle alors qu'il apparaissait carré sur la base des informations haptiques disponibles. Les résultats montraient que les estimations visuo-haptiques des participants reposaient systématiquement sur la base des informations visuelles, comme s'ils ignoraient les informations haptiques. Cet effet est maintenant connu comme la " capture visuelle » (Rock et Victor, 1964). Dans une autre étude, une " capture haptique " était observée dans une condition où l'information visuelle était dégradée (Heller, 1983). Plus tard, Welch et Warren (1986) proposaient l'idée selon laquelle la résolution d'un conflit perceptif se ferait sur la base de la modalité sensorielle la plus précise.

Ernst et Banks (2002) et Ernst (2006) ont récemment proposé un modèle plus général de perception multimodale où toutes les informations sensorielles disponibles étaient utilisées, chacune étant pondérée en fonction de leur fiabilité, dans l'estimation perceptive finale. Il est à noter que, dans cette perspective, le phénomène de capture se produit quand une modalité a une fiabilité beaucoup

plus élevé que les autres. Dans l'étude d'Ernst et Banks (2002), la taille d'un objet était estimée sur la base d'informations visuelles, haptiques, ou visuo-haptiques. Le dispositif permettait la perception visuelle d'un objet cuboïde plus ou moins bruitée au moyen d'un affichage aléatoire de points en vision stéréoscopique. Différents niveaux de bruit étaient introduits afin de détériorer l'estimation sur la base d'informations visuelles de la taille de l'objet. Au contraire, le dispositif haptique simulait la taille d'un objet qui ne variait pas au cours de l'expérience. Comme prévu, les estimations multimodales de la taille de l'objet dépendaient d'une combinaison des deux estimations sensorielles pondérées en fonction de leur variance relative. Dans ce modèle statistique d'Ernst et Banks (2002), le système nerveux central se comporterait comme un estimateur du maximum de vraisemblance (MLE) : il utiliserait des connaissances a priori sur les propriétés des systèmes sensoriels et serait en capacité de déterminer leur fiabilité et donc la meilleure manière de les combiner afin d'améliorer les estimations multimodales et d'augmenter leur fiabilité. Ce modèle est en mesure de prédire un grand nombre de situations, comme par exemple l'apprentissage de nouvelles habiletés motrices (Körding et Wolpert, 2004), ou le pointage vers une cible lors de l'utilisation prisme optique (van Beers *et al.*, 1999). Il permet également une description possible des stratégies de codage neural que le cerveau pourrait utiliser afin d'augmenter la fiabilité des estimations multimodales (Knill et Pouget, 2004). Enfin, une prédiction importante du modèle est que la fiabilité de l'estimation multimodale est meilleure (c'est à dire avec une variance plus faible) que celle de chaque estimation uni modal, ce qui représente un avantage adaptatif (Harris et Wolpert, 1998). Pris dans son ensemble, les données disponibles en faveur du modèle d'intégration des informations sensorielles suggèrent que le système nerveux central est capable de détecter le système le plus précis et peut ajuster son poids en fonction des contraintes environnementales dans l'estimation multimodale.

Plus récemment, Gori *et al.* (2008) posaient la question de l'émergence de la combinaison optimale des informations visuelles et haptiques pendant l'enfance. Ils ont placé un écran strié à différentes

distances d'un objet visuel pour bruite la perception visuelle de son orientation alors que la perception haptique n'était pas bruitée. Chez les adultes, les résultats étaient similaires à ceux obtenus par Ernst et Banks (2002) : le poids des informations visuelles était supérieur à celui des informations haptiques en absence d'altération des informations visuelles, mais il diminuait lorsque le niveau d'altération des informations visuelles augmentait. Les performances dans la modalité visuo-haptique étaient conformes aux prédictions du modèle bayésien basé sur le MLE et la variance visuo-haptique était inférieure à la variance visuelle et haptique. Les résultats montraient également que les enfants utilisaient préférentiellement des informations visuelles dans la tâche perceptive d'orientation avant l'âge de huit ans. Les stratégies évoluaient progressivement et permettaient, à l'âge de dix ans, une intégration multisensorielle basé sur le MLE. Les données suggèrent que les enfants de moins de 8 ans ne peuvent pas détecter le système le plus précis, peut-être parce qu'ils n'ont pas assez d'expérience (connaissances a priori) dans les multiples perceptions des propriétés. Un autre point est que l'intégration optimale des informations sensorielles apparaît alors comme dépendante de la maturation du cerveau, avec une amélioration déterminante autour de 8-10 ans. En revanche, la perte éventuelle de cette capacité chez les personnes plus âgées n'a pas été évaluée. De même, nous ne savons pas comment les lésions cérébrales affectent l'intégration des informations multisensorielles, en particulier chez les patients présentant des lésions des aires dites associatives aboutissant ou non à une déficience de l'orientation spatiale.

En ce qui concerne la perception des orientations, le paradigme classique consiste à demander aux individus d'estimer la perception de la verticale, c'est-à-dire la direction idiosyncrasique de la pesanteur. Les modalités d'évaluation de cette verticale subjective sont relativement standard. Dans la modalité visuelle, une barre lumineuse est présentée dans une pièce sombre et la tâche des participants est de faire tourner la barre pour la mettre verticale à l'aide d'un joystick (par exemple Luyat *et al.*, 1997) ou d'instructions verbales (par exemple Bonan *et al.*, 2006a). Dans la modalité haptique, la barre n'est pas éclairée, et les participants doivent la mettre verticalement en utilisant

les informations haptiques de la main (par exemple Kerkhoff, 1999). Dans la modalité visuo-haptique, les participants bénéficient des informations visuelles et haptiques (Saj *et al.*, 2005a ; Saj *et al.*, 2005b).

Des études antérieures ont mis en évidence que les patients atteints de lésions cérébrales montrent souvent une déviation de la VS. Brandt *et al.* (1994), par exemple, ont rapporté que les lésions corticales unilatérales postérieures conduisent à une déviation contralatérale de la VS. En outre, les lésions pariétales droites résultant d'une attaque cérébrale conduisent souvent à une déviation anti-horaire de la VS (Yelnik *et al.*, 2002) et la négligence spatiale qui résulte parfois de ces lésions peut amplifier la déviation de la VS (Kerkhoff, 1999 ; Saj *et al.*, 2005a ; Saj *et al.*, 2005b). L'hémianopsie peut également modifier la VS dans le sens anti-horaire (Saj *et al.*, 2012a). Chez les patients cérébro-lésés, une déviation de la VS pourrait résulter d'un déficit multisensoriel parce que les lésions cérébrales impliquent des structures cérébrales jouant un rôle déterminant dans l'intégration des informations sensorielles (Utz *et al.*, 2011) mais cette hypothèse n'a pas vraiment été directement testée.

Cette étude a donc été conçue pour évaluer l'intégration des informations multisensorielles dans la perception de l'orientation. Nous avons comparé la perception de la VS dans la modalité visuelle, haptique et visuo-haptique, en utilisant le même appareil et une méthode d'évaluation proche dans les trois conditions.

En conformité avec le modèle MLE, la VVHS des jeunes adultes en bonne santé doit être prédite à partir des performances obtenues dans les VVS et VHS, pondérés en fonction de leurs fiabilités respectives. En outre, la fiabilité de la VVHS devrait être plus importante que celles des VVS et VHS.

Conformément à la littérature, le poids des informations visuelles doit être supérieur au poids des informations haptiques.

Afin d'évaluer les limites du modèle, les adultes âgés en bonne santé, ainsi que des patients cérébro-lésés, avec ou sans déficits de la cognition spatiale, ont été inclus dans l'étude.

Un objectif secondaire était de confirmer les résultats de la littérature chez les patients cérébro-lésés.

Méthodes

Participants

Vingt et un jeunes adultes en bonne santé (JA, âge moyen: $23,9 \pm 2,3$ ans, neuf hommes et douze femmes), huit adultes plus âgés en bonne santé (AA, âge moyen: $53,5 \pm 6,9$ années, trois hommes et cinq femmes) et seize patients cérébro-lésés droits ont participé à cette étude après avoir signé un formulaire de consentement éclairé. Ils étaient tous droitiers avec un score supérieur à 18/20 au test de latéralité Edinburgh (Oldfield, 1971).

Les deux groupes de participants sains n'avaient pas de trouble psychiatrique, aucun antécédent de lésion cérébrale, ils avaient une vision normale ou corrigée.

Les patients ont été recrutés dans l'unité de réadaptation neurologique de l'hôpital Swynghedauw (CHRU de Lille). Ils avaient tous une lésion cérébrale droite unique relativement récente (entre 5-20 semaines) documentée par IRM. Les patients atteints du syndrome de « pusher » (Karnath *et al.*, 2000), des lésions bilatérales, des signes psychiatriques, des signes vestibulaires graves (vertiges, nystagmus), des troubles graves du comportement ou des troubles moteurs du bras droit ont été exclus de l'étude.

La présence de signes de négligence spatiale gauche a été évaluée par une batterie de tests neuropsychologiques : barrage de cloches (Gauthier *et al.*, 1989), bissection de lignes (Schenkenberg *et al.*, 1980) et copie de la scène d'Ogden (1985). Les patients ont été diagnostiqués comme négligents (N +) quand ils échouaient à au moins deux des trois tests. Ils ont également passé un examen du champ visuel (périmètre de Goldmann) pour détecter des signes

d'hémianopsie. Dix patients ($63,8 \pm 11,4$ ans) ont été inclus dans le groupe N+, six d'entre eux avaient une hémianopsie. Les six autres patients ($57,3 \pm 15,8$ ans) n'avaient pas de signes de négligence et ont été inclus dans le groupe non négligent (N-), et aucun souffrait d'hémianopsie (tableau 2).

Groupe	Age (en années)	Sexe	Années d'étude	Délai (en semaines)	Test de barrage			Copie de scène (/4)	Bissection (%)	Hémianopsie
					Gauche (/15)	Centre (/5)	Droite (/15)			
N+	60	M	13	8	10	2	1	4	43	-
N+	70	M	11	10	7	1	0	4	46	-
N+	54	F	10	9	5	0	2	0	30	-
N+	73	F	8	7	7	0	2	0	15	-
N+	55	M	15	5	15	2	0	1	67	+
N+	54	M	15	8	15	5	10	4	70	+
N+	46	F	10	5	5	0	2	3	16	+
N+	70	F	8	10	7	0	2	0	18	+
N+	76	F	11	5	15	5	5	4	74	+
N+	80	F	8	7	8	1	3	2	20	+
N-	70	F	8	9	0	0	1	0	9	-
N-	62	M	20	16	2	0	2	0	-1	-
N-	69	M	8	20	1	0	0	0	3	-
N-	56	M	11	8	2	0	1	0	-2	-
N-	60	M	14	6	0	0	0	0	-1	-
N-	27	M	13	13	2	0	0	0	1	-

Tableau 2 : Données cliniques des patients présentant le groupe d'inclusion, l'âge, le sexe, le nombre d'années d'études, le délai entre le moment de la lésion et de l'inclusion dans l'étude, les tests cliniques d'inclusion comprenant le nombre d'omissions (pour le barrage de cloches), le score de la copie de scène (score de 0 à 4), le pourcentage moyen de déviation au test de bissection de lignes et la présence d'une hémianopsie.

Matériel

Voir la partie «Méthodologie générale» au début de la partie «Contributions expérimentales»

Procédure

Les participants étaient placés sur le lit d'hôpital à une distance de 40 cm du disque centré par rapport à leur corps. La tête était tenue par une sangle. La tâche était d'aligner la barre (initialement inclinée à 45° ou 45° au début de chaque essai) avec la gravité à l'aide d'informations visuelles (V), haptiques (H) ou visuo- haptiques (VH). Dans la VVS, les participants voyaient la barre, mais n'étaient pas autorisés à la toucher : ils indiquaient verbalement (le haut de la barre vers la droite ou vers la gauche) à l'expérimentateur comment aligner verticalement la barre avec la gravité. Dans la VHS, les participants avaient les yeux bandés. Leur main droite était placée par l'expérimentateur au centre de la barre et ils étaient invités à aligner la barre avec la verticale gravitaire, en utilisant uniquement des informations haptiques. Les participants n'explorer pas la barre, ils pouvaient uniquement manipuler le centre de la barre. Dans la modalité combinée (VVHS), les participants voyaient la barre et devaient la ramener à la verticale en utilisant les informations haptique en ne touchant que le centre de la barre. L'importance de fournir des estimations précises de la VS était soulignée. Le temps de réalisation n'était pas pris en compte, mais les ajustements ne dépassaient jamais quelques secondes. Chaque participant était testé dans les trois conditions (VVS, VHS et VVHS), et l'ordre de présentation était contrebalancé entre les participants. Chaque participant effectuait deux ajustements pour chaque position initiale de la barre pour un total de 12 réglages ($3 \text{ conditions} * 2 \text{ positions initiales} * 2 \text{ essais}$). L'orientation de la barre a été enregistrée après chaque essai et la déviation par rapport à la verticale gravitaire était calculée en degrés.

Intégration optimale de l'information multisensorielle

La méthode de calcul des poids des informations visuelles et haptiques et de la prédiction des performances dans la modalité visuo-haptique est décrite dans la partie 2.4. de la partie introductive.

Les analyses statistiques

Pour chaque participant, le poids des informations visuelles et haptiques individuels ont été calculés à partir des données brutes et permettaient le calcul de la VVHS prédite par le modèle bayésien MLE. Les prédictions étaient comparées aux observations. Les variances visuo-haptiques étaient comparées aux variances visuelles et aux variances haptiques.

Pour chaque groupe, les VS ont été comparés à la verticale gravitaire (0°) en utilisant le test t de Student standard afin de détecter les biais possibles par rapport à la verticale gravitaire. Une analyse de variance a été réalisée sur les valeurs brutes pour comparer les quatre groupes et des tests de Newman-Keuls ont été utilisés pour les comparaisons à postériori. Le niveau de signification a été fixé à $p = 0,05$ (bilatéral).

Résultats

Poids visuel et haptique

Les poids donnent une estimation de la précision relative des systèmes sensoriels. Au plus une information est précise (moins variable) au plus son poids relatif est important. Le poids visuel (figure 2.15) différait selon le groupe ($F(3, 41) = 7,23$; $p < 0,01$). Les comparaisons par paires montraient en moyenne que le poids visuel du groupe de négligents ($0,57 \pm 0,29$) n'était pas différent de celui du groupe de non négligents ($0,68 \pm 0,42$; $p = 0,33$), mais différaient de celui des jeunes ($0,93 \pm 0,14$; $p < 0,01$) et des plus âgés ($0,95 \pm 0,08$; $p < 0,01$). En moyenne le poids du visuel du groupe de non négligents était différente de celui des jeunes ($p = 0,02$) et des plus âgés ($p = 0,02$). Enfin, le poids du visuel était similaire chez les jeunes et les plus âgés ($p = 0,83$).

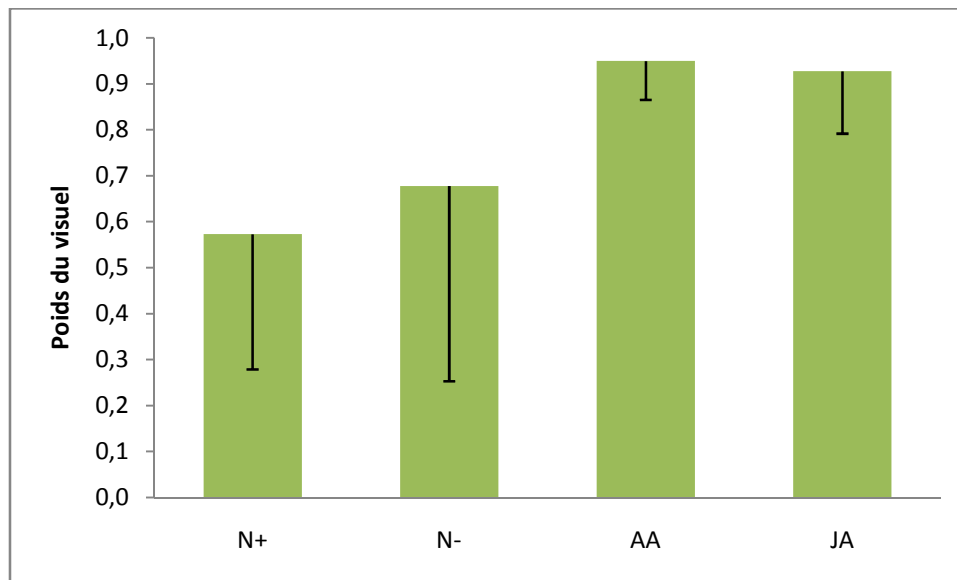


Figure 2.17. Moyennes des poids du visuel en fonction du groupe.

Corrélation entre les estimations et les performances observées

À partir des poids du visuel et de l'haptique individuels et les performances moyennes individuelles dans les tâches uni modales de chaque participant, les performances visuo- haptiques prédites étaient calculés (équation 3). Les corrélations entre les mesures prédites et observées sont présentées dans les Figures 2.16 et 2.17. La plupart des points sont proches de la ligne $y = x$, pour les adultes sains ainsi que pour les patients. Les droites de régression étaient similaires dans les différents groupes. Chez les patients, $y = 0,93 x - 1,37$ et $r = 0,77$ (non négligents : $r = 0,88$; négligents : $r = 0,73$). Chez les adultes en bonne santé, $y = 0,82 x + 0,07$ et $r = 0,79$ (jeunes : $r = 0,57$; plus âgés : $r = 0,93$).

Comparaison des erreurs variables.

Le modèle bayésien testé dans la présente étude prédit une amélioration de la précision (variance plus faible) dans la condition bimodale par rapport aux conditions haptiques et visuelles considérés séparément. Pour tester ce critère de validité, la variance VH était comparée aux variances V et H. La différence de variance V -VH était positive chez des participants sains ($0,5 \pm 2,3$), ainsi que chez les patients ($6,5 \pm 10,8$). De même, la différence de variance H -VH était

positive chez les adultes sains ($16,3 \pm 24,6$) et chez les patients ($19,8 \pm 20,4$). L'analyse de variance révélait un effet de la modalité ($F(2, 82) = 21,30$; $p < 0,01$) qui ne dépendait pas du groupe ($F(6, 82) = 0,81$; $p = 0,56$). Les comparaisons *a posteriori* montraient que la différence de variance H - VH était significative ($p < 0,01$) et que la différence de variance V - VH n'était pas significative ($p = 0,34$).

Perception de la verticale

Dans le groupe de négligents, la VS était déviée dans le sens antihoraire et différée de la verticale gravitaire dans les trois conditions sensorielles (visuelle : $-3,9^\circ \pm 4,14^\circ$; $p = 0,01$; haptique : $-5,9^\circ \pm 4,3^\circ$; $p < 0,01$; visuo- haptique : $-3,0^\circ \pm 3,3^\circ$; $p = 0,02$). Dans le groupe de non négligents, la VS était dévié dans le sens antihoraire et différée de la verticale gravitaire dans la condition haptique ($-4,9^\circ \pm 4,6^\circ$; $p = 0,05$), mais elle était proche de la verticale gravitaire dans la condition visuelle ($+0,5^\circ \pm 3,7^\circ$; $p = 0,75$) et visuo- haptique ($-0,3^\circ \pm 1,9^\circ$; $p = 0,68$). La VS du groupe de participants sains plus âgés était déviée dans le sens antihoraire dans la condition haptique ($-3,2^\circ \pm 3,3^\circ$; $p = 0,03$), mais était proche de la verticale gravitaire dans la condition visuelle ($-0,2^\circ \pm 1,2^\circ$; $p = 0,65$) et visuo- haptique ($-0,2^\circ \pm 1,3^\circ$; $p = 0,64$). La VS du groupe de jeunes adultes sains était déviée dans le sens horaire dans la condition haptique ($+3,1^\circ \pm 3,1^\circ$; $p < 0,01$) mais était proche de la verticale gravitaire dans la condition visuelle ($-0,1^\circ \pm 1,0^\circ$; $p = 0,63$) et visuo- haptique ($-0,1^\circ \pm 0,9^\circ$; $p = 0,79$; voir Figure 2.18). Les estimations visuo-haptiques sont comprises entre les estimations visuelle et haptique dans 6 cas sur 10 (N+), 3 sur 6 (N-), 4 sur 8 (A) et 12 sur 21 (J). Elles sont plus petites dans 2 cas sur 10 (N+), 3 sur 6 (N-), 3 sur 8 (A) et 4 sur 21 (J). Les erreurs variables dans la modalité visuo-haptique sont plus faibles que celles des modalités visuelle ou haptique dans 8 cas sur 10 (N+), 4 sur 6 (N-), 4 sur 8 (A) et 14 sur 21 (J), et elles se situent entre les deux dans les autres cas.

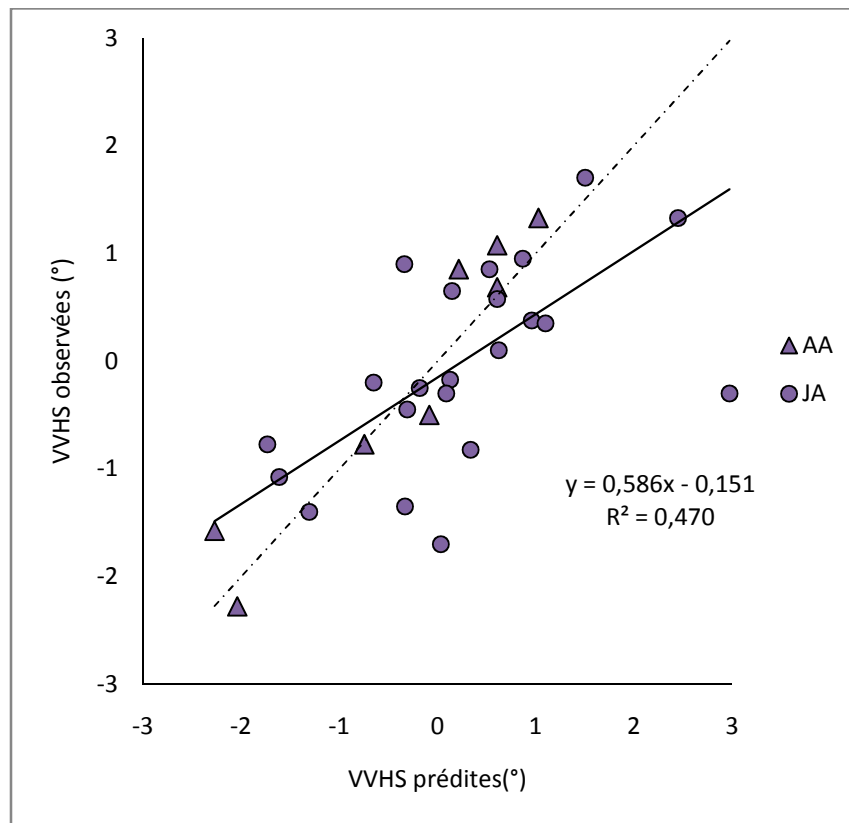


Figure 2.18 : VVHS observées en fonction des VVHS prédites pour les groupes de participants sains. Le trait noir représente la corrélation linéaire pour les participants sains, la ligne en pointillés représente la corrélation théorique ($y = x$).

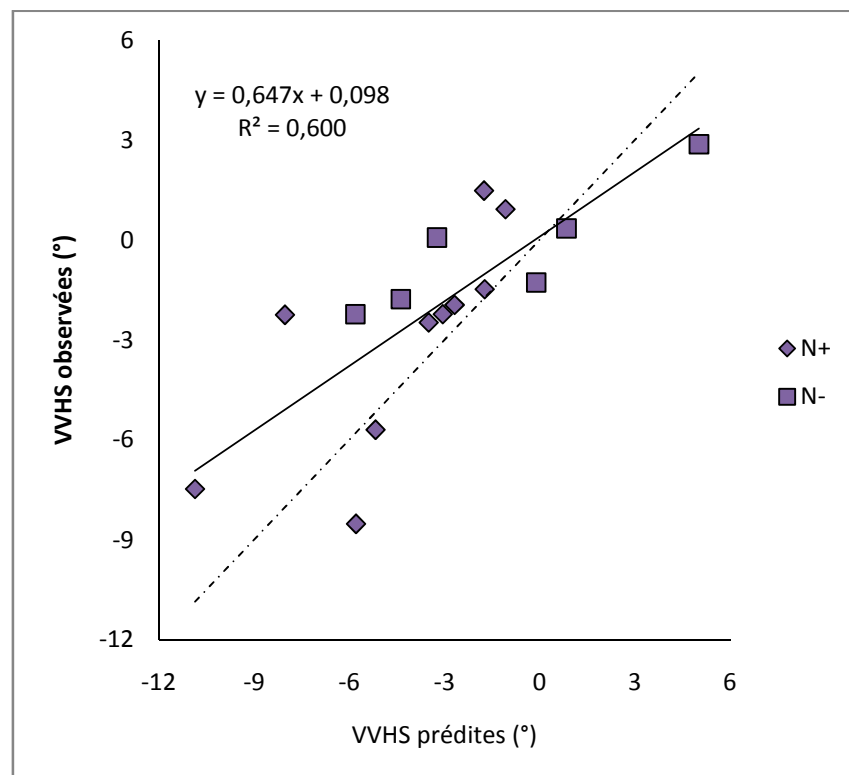


Figure 2.19 : VVHS observées en fonction des VVHS prédites pour les groupes de patients. Le trait noir représente la corrélation linéaire pour les patients, la ligne en pointillés représente la corrélation théorique ($y = x$).

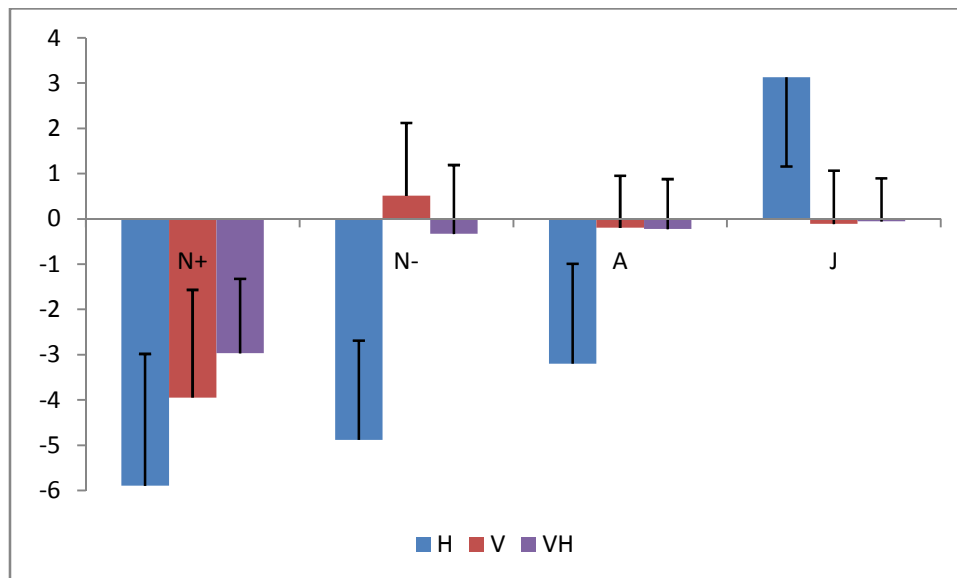


Figure 2.20: Verticales subjectives (erreurs constantes) en fonction du groupe et de la modalité.

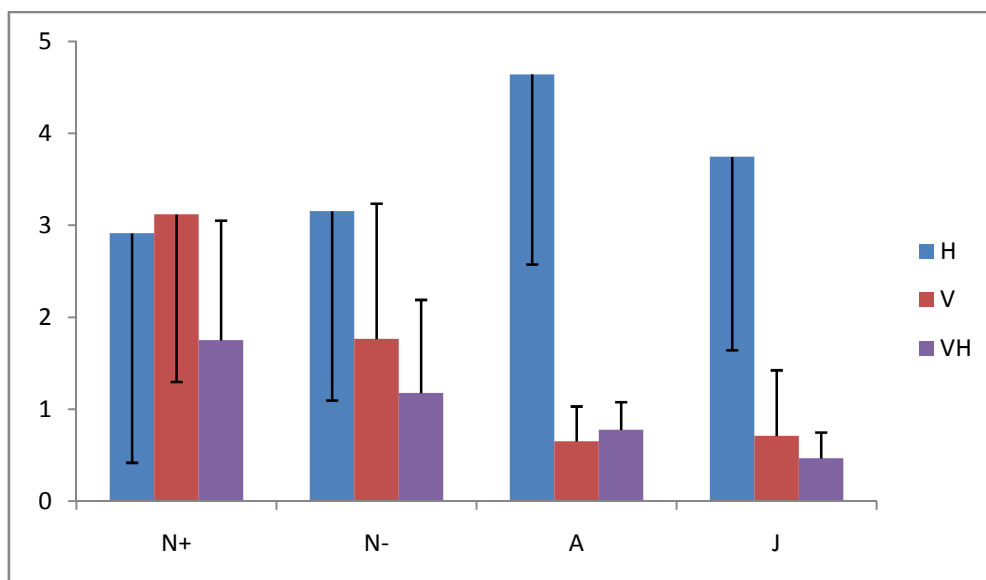


Figure 2.21 : Erreurs variables en fonction du groupe et de la modalité

L'analyse de variance révélait un effet du groupe ($F(3, 41) = 14,1$; $p < 0,01$), un effet de la condition sensorielle ($F(2, 82) = 8,5$; $p < 0,01$) et une interaction significative entre les deux facteurs ($F(6, 82) = 12,2$; $p < 0,01$). Dans le groupe de négligents, la VS dans la condition haptique était plus inclinée que dans la condition visuo- haptique ($p = 0,04$) mais pas plus que dans la condition visuelle ($p = 0,13$). Dans le groupe de non négligents, la VS dans la condition haptique était plus inclinée que la VS dans les conditions visuelles et visuo-haptiques ($p < 0,01$). Dans le groupe de participants sains plus âgés, la VS dans la condition haptique était plus inclinée que la VS

dans la condition visuelle ($p = 0,03$) et la condition visuo- haptique ($p = 0,02$). Dans le groupe des jeunes adultes sains, la VS dans la condition haptique était plus inclinée que la VS dans les conditions visuelles et visuo-haptiques ($p < 0,01$).

Discussion

Le but de la présente étude était de déterminer si les performances de la VS visuo-haptiques pouvaient être prédites à partir des performances dans les conditions visuelles et haptique grâce au modèle bayésien MLE (Ernst et Banks, 2002). Les participants sains jeunes et plus âgés ainsi que les patients atteints de lésion cérébrale, entraînant parfois des déficits de la cognition spatiale, étaient inclus afin d'évaluer les limites du modèle. La VS visuo-haptique était correctement prédite par le modèle MLE, dans les quatre groupes de participants. Dans les groupes de patients, le poids du visuel et le poids de l'haptique étaient proches, alors que chez les participants sains, le poids du visuel était plus important que le poids de l'haptique. La VS visuo-haptique était bien prédite, malgré la différence importante des performances visuelles et haptiques. Comme prévu, les VS étaient déviée dans le sens anti-horaire dans le groupe de négligents. En revanche, seule la VS haptique était déviée dans le sens anti-horaire dans le groupe de non négligents et de participants sains plus âgés. Enfin seule la VS haptique était déviée dans le sens horaire dans le groupe de jeunes adultes sains.

L'intégration multisensorielle dans la verticale subjective

Quel que soit le groupe d'adultes sains, les performances dans la VS visuo-haptique étaient correctement prédites à partir de la VS visuelle et de la VS haptique pondérée par leur précision respective. Comme prévu, les performances visuo-haptiques étaient proches des prédictions du modèle MLE l'intégration multisensorielle pour les jeunes participants sains (Gori *et al.*, 2008) et nous avons montré pour la première fois que les performances visuo-haptiques des participants

sains plus âgés étaient également correctement prédites par ce modèle. En outre, la variance dans la modalité visuo-haptique était plus petite que celle des modalités visuelles ou haptique, comme prédit par le modèle (Ernst et Banks, 2002 ; Gori *et al.*, 2008). Le vieillissement ne semble donc pas affecter le traitement multisensoriel, au moins en ce qui concerne la tâche d'orientation.

Chez les patients, le poids du visuel diminuait et était proche du poids de l'haptique, alors que chez les participants sains, le poids du visuel était proche de 1. Les déficits visuo-spatiaux pourraient augmenter l'incertitude dans le système visuel et ainsi donc donner plus d'importance aux informations haptiques. Malgré le poids du visuel diminué chez les patients, les performances visuo-haptique restent bien prédites par le modèle grâce aux estimations visuelles et haptiques pondérées par leur précision relative. Ainsi, les patients semblaient intégrer l'information visuelle et haptique, de la même manière que les sujets sains, afin d'améliorer la fiabilité de l'estimation multisensorielle de la verticale subjective. En conséquence, l'impact de la lésion cérébrale et les déficits visuo-spatiaux sur l'intégration multisensorielle apparaît faible, en ce qui concerne la perception de la verticale. Ce résultat est frappant car la littérature suggère que les déficits observés dans les tâches de perception de verticale dans différentes modalités reflètent un déficit d'intégration multisensorielle (par exemple, Funk *et al.*, 2010b). La présente étude suggère que malgré la présence de déficits visuo- spatiaux chez les patients cérébro-lésés, conduisant à une perturbation de la perception de la verticale, l'intégration de l'information visuelle et haptique est relativement préservée. Intégration multimodale ne semble donc pas dépendre uniquement sur les zones corticale postérieure droite.

Perception de la verticale

Chez les participants sains, jeunes et plus âgés, la VS visuelle était proche de la verticale gravitaire : cette mesure est connue pour être très précise avec des erreurs de moins d'un degré

(Mann, 1952). La VS visuo-haptique pour ces deux groupes était également proche de la verticale gravitaire et donc de la VS visuelle. En outre, l'information visuelle est principalement utilisée dans la condition visuo-haptique, comme prévu, car l'information visuelle n'était pas été modifiée (Ernst et Banks, 2002 ; Ernst 2006). Au contraire, la VS haptique était légèrement déviée pour les adultes sains jeunes et plus âgés et de façon surprenante, les performances sont sensiblement différentes de la verticale gravitaire. La plage normale de la VS haptique est comprise entre $\pm 4,5^\circ$ (Pérennou *et al.*, 2008), mais les études sur la VS haptique présentent généralement des performances assez proches de la verticale gravitaire : par exemple Luyat *et al.*, (2005) rapportent une déviation moyenne de $-0,15^\circ \pm 0,42^\circ$ chez les jeunes participants en bonne santé). Dans notre étude, la méthode utilisée limitait l'exploration de la barre, ce qui pourrait être responsable de la déviation observée. Toutefois, la direction de la déviation était opposée dans les deux groupes de participants sains avec une déviation horaire chez les jeunes adultes et une déviation anti-horaire chez les adultes plus âgés. Dans le passé, très peu d'études sur l'orientation spatiale ont comparé les performances de participants jeunes et moins jeunes : les études précédentes comprenaient soit des jeunes adultes, principalement pour étudier les questions théoriques soit des adultes plus âgés (généralement plus de 50 ans) pour étudier les problèmes neuropsychologiques et appariés à une population de patients. Dans une méta- analyse portant sur les performances de bissection de lignes, Jewell et McCourt (2000) montraient que les jeunes adultes ont tendance à dévier vers la gauche dans une tâche de bissection de lignes, tandis que les adultes plus âgés ont tendance à dévier vers la droite. Cet effet de l'âge, analogue à celle que nous observons dans la condition haptique, a été interprété comme une diminution liée à l'âge dans la capacité de l'hémisphère droit de répartir l'attention spatiale.

En ce qui concerne le groupe de non négligents, les VS visuelles et visuo-haptiques étaient proches de la verticale gravitaire comme prévu. Bien qu'ils aient une lésion cérébrale, ils ne

montrent généralement pas de déficits visuo-spatiaux. En ce qui concerne le groupe de négligents, les VS visuelles et visuo-haptiques étaient déviées dans le sens antihoraire comme habituellement observée chez les patients présentant des déficits visuo-spatiaux telles que la négligence ou l'hémianopsie (Kerkhoff, 1999 ; Saj *et al.*, 2012a ; Utz *et al.*, 2011). Ces biais de perception peuvent être dus à un déficit dans la représentation centrale de la gravité suite à des lésions postérieures (Rousseaux *et al.*, 2013). Elle peut aussi résulter d'un trouble postural (Pérennou *et al.*, 2008 ; Saj *et al.*, 2005c) ou d'un déficit visuo -spatiale (Utz *et al.*, 2011). Ils peuvent enfin être associés à une représentation spatiale perturbée en raison d'une altération de l'intégration des signaux sensoriels dans le cerveau endommagé (Funk *et al.*, 2010b). Fait intéressant, la VS haptique était nettement déviée dans le sens antihoraire pour les non- négligents et encore plus déviée que dans les autres modalités pour le groupe de négligents. Ce résultat contraste avec les résultats des études antérieures montrant que, lorsque la tête est maintenu droit , la VS haptique ne diffère pas de VS visuelle chez les patients atteints de lésions cérébrales droit sans signes de négligence (Funk *et al.*, 2010a ; Pérennou *et al.*, 2008). Dans ces deux études, l'exploration de la barre a été encouragée tandis que dans la présente étude, l'exploration de la barre n'a pas été autorisée (la barre était tenue en son centre). Nous pouvons supposer qu'en l'absence d'informations visuelles, l'information haptique limitée dans la présente étude n'était pas suffisante pour percevoir avec justesse la verticale.

En conclusion, la VS était déviée dans le sens antihoraire dans le groupe de négligents, pour les trois modalités. Chez les patients non-négligents et chez les adultes sains, les VS visuelles et visuo-haptiques étaient proches de la verticale gravitaire, alors que la VS haptique était déviée dans le sens antihoraire chez les patients non-négligents et les adultes plus âgés sains et dans le sens horaire pour les jeunes adultes sains. Malgré ces différences, l'intégration des informations visuelles et haptiques était statistiquement optimale, ce qui signifie que le système nerveux central privilégie

les informations les plus précises et leur donne un poids plus important dans la performance multisensorielle. En conséquence, l'incertitude de la performance multimodale était moindre que celle des performances unimodales. Les personnes âgées intègrent également les informations visuelles et haptiques de cette manière optimale. Après un AVC hémisphérique droite, cette capacité est encore préservée même lorsque les participants ont souffert de déficits visuo-spatiaux. Les programmes de rééducation pourraient bénéficier de l'aide de stimuli multimodaux au lieu de l'utilisation de stimuli uniquement visuels comme il est souvent le cas.

Troisième partie expérimentale : Évaluation de la verticale subjective dans la modalité haptique

Etude V : Effet des conditions d'évaluation sur la perception de la verticale

haptique

La rédaction de cette étude est réalisée à partir du chapitre dont la référence est rappelée ci-dessous.

Braem B., Rousseaux M., Coello Y., Honoré J. (2012). Verticale subjective haptique : influence des conditions d'évaluation. In A. Hamaoui, M. Lacour (Eds) *Posture et Équilibre*, Paris : De Boeck-Solal.

Résumé

Des participants sains droitiers et gauchers devaient aligner une barre avec la verticale gravitaire avec la main gauche ou la main droite, les yeux bandés. Ils pouvaient explorer librement la barre pour réaliser les ajustements ou devaient la tenir en son centre sans l'explorer. Les résultats indiquent une absence de différence entre les droitiers et les gauchers. En revanche, les performances diffèrent en fonction de la main utilisée lors des ajustements : la verticale subjective est déviée du côté de la main. Par ailleurs, les déviations augmentent quand les possibilités d'exploration sont réduites. De plus, une déviation quasi systématique de la verticale subjective en direction de la position initiale de la barre est observée. Elle pourrait résulter d'une mauvaise estimation de la position initiale de la barre dans la modalité haptique.

Introduction

Agir sur les objets et les êtres qui nous entourent nécessite une activité posturale adaptée, laquelle requiert une perception correcte de la verticale gravitaire (VG). Cette perception repose sur l'intégration d'informations provenant d'afférences multiples, notamment visuelles, proprioceptives et vestibulaires. Cette capacité à percevoir la verticale peut s'évaluer en demandant aux participants de juger l'alignement de l'axe principal d'un objet par rapport à la VG. L'objet peut être perçu par la vision, la somesthésie ou l'audition, ou encore par plusieurs modalités simultanément. Cette étude vise à cerner l'impact de contraintes inhérentes à cette méthode sur la mesure qui en résulte, lorsque l'objet est ajusté à la verticale sur la base d'informations tactilo-kinesthésiques.

La verticale perçue ou verticale subjective (VS) est évaluée dans l'obscurité complète au moyen d'une barre mobile autour de son centre ou de l'une de ses extrémités ; le participant doit la ramener à la verticale à partir de positions initiales variables. Deux modalités sont principalement étudiées. Dans la modalité haptique (VHS ; e.g. Luyat *et al.*, 2001), le participant ne voit pas la barre et il utilise sa main, généralement la main préférée, pour l'ajuster à la verticale. Dans la modalité visuelle (VVS) le sujet voit la barre mais ne la touche pas ; il la déplace au moyen de commandes orales (e.g. Bohmer et Mast, 1999), d'un joystick (e.g. Luyat *et al.*, 1997) ou de boutons (e.g. Yelnik *et al.*, 2002). Une troisième condition, visuo-haptique (VVHS), est moins utilisée : le participant voit la barre et la ramène à la verticale manuellement (Saj *et al.*, 2005a ; Braem *et al.*, 2011).

Les déviations par rapport à la verticale objective sont généralement notées positivement lorsqu'elles sont dans le sens horaire (haut de la barre vers la droite), et négativement lorsqu'elles sont dans le sens anti-horaire (haut de la barre vers la gauche). Les mesures obtenues peuvent être résumées par la moyenne algébrique des déviations ou erreur constante, qui reflète l'exactitude de la mesure, et par l'écart-type de ces déviations, qui reflète la précision de la mesure. Ce chapitre traite essentiellement de l'erreur constante, qui est faible lorsque les participants sont exempts de trouble visuel, proprioceptif, vestibulaire, ou neurologique, quand l'environnement ne fournit pas de

référence perturbante et que les participants sont en posture érigée. Selon Pérennou (2005), les performances peuvent être considérées comme normales quand la VVS est comprise entre $\pm 2,5^\circ$ et quand la VHS est comprise entre $\pm 4,5^\circ$. Aucun intervalle de normalité n'a été proposé pour la VVHS, mais celle-ci n'est pas statistiquement différente de la VVS (Etude 1). Dans l'étude 2, les VVS et VVHS de participants sains étaient très proches de la verticale gravitaire ($-0,2^\circ$ et $-0,1^\circ$, respectivement) alors que la VHS obtenue avec la main droite était systématiquement déviée dans le sens horaire ($+2,7^\circ$). Pour ces participants placés dans une posture érigée, les écarts-types des VVS et de VVHS étaient petits (respectivement à $0,6^\circ$ et $0,4^\circ$), comparés à ceux de la VHS ($2,0^\circ$). Cependant, seule la main droite était testée dans ce travail et la manipulation de la barre se faisait au niveau de son axe de rotation, sans exploration tactile complète de cet objet. Il reste donc possible que la déviation horaire de la VHS résulte d'une mauvaise estimation de la position de la main et qu'une déviation de signe opposé puisse être obtenue avec la main gauche. De fait, les observations de Bauermeister *et al.* (1964) suggèrent une symétrie des performances en VHS, selon la main utilisée. Par ailleurs, dans l'étude de Braem *et al.* (2009), la barre était tenue par le centre et seuls les mouvements de rotation du poignet étaient autorisés. La déviation aurait peut être été moindre avec une exploration plus active, impliquant plusieurs articulations. La perception des propriétés seraient en effet de meilleure qualité grâce à une exploration active, appelée « tactile scanning » par Gibson (1962) par rapport à une estimation statique.

Dans cette méthode d'ajustement, pour des raisons méthodologiques évidentes, la position de la barre est initialement déviée, dans le sens horaire ou dans le sens anti-horaire. L'effet de cette variable « méthodologique » semble peu pris en compte aujourd'hui. Pourtant, un travail ancien de Werner et Wapner (1952) indique que la VVS de participants sains est systématiquement déviée vers la position initiale (-30° , 0° et $+30^\circ$). D'après les données fournies par ces auteurs, l'erreur constante varie en moyenne de $0,8^\circ$ entre des positions initiales différant de 30° . Autrement dit la pente caractérisant cet effet est de 2,7 %. Cet effet de la position initiale de la barre paraît suffisant

pour annuler l'effet Müller (Hoppenbrouwers *et al.*, 2004). L'effet Müller ou effet E correspond à une déviation de la VVS du côté opposé à une inclinaison modérée (inférieure à 60°) de la tête ou du corps en roulis (cf. Bauermeister *et al.*, 1964). Dans l'étude de Hoppenbrouwers *et al.* (2004), l'effet E n'apparaît pas lorsque la position initiale de la barre est parallèle à l'axe de la tête. Dans l'étude de Braem *et al.*, (2009), une comparaison des VVS, VHS et VVHS a été réalisée chez des participants sains, avec 4 positions initiales (de -45° à +45°). Seule la VHS était dépendante de la position initiale de la barre : les performances déviaient vers les positions de départ. Les pentes ont été calculées dans les trois conditions : 0,4% dans la condition visuelle, 5,1% dans la condition haptique et 0,1% dans la condition visuo-haptique. Taguchi *et al.* (1995), n'obtiennent pas non plus d'effet de la position initiale de la barre pour la VVS. Les données concernant les effets possibles de la position initiale de la barre sur la VS sont donc contradictoires : les différences de méthodologie susceptibles d'expliquer ce désaccord seront analysées dans la discussion.

En résumé, les données de la littérature suggèrent une absence de déviation de la VVS et de la VVHS chez les participants sains, en opposition aux déviations horaires systématiques de la VHS réalisée avec la main droite. Des déviations vers les positions de départ sont retrouvées dans les trois conditions mais cet effet semble plus reproductible et plus ample dans la modalité haptique sans exploration. Il persiste des incertitudes sur les déterminants de ces effets. L'objectif de ce travail était de lever partiellement ces incertitudes 1) en comparant les VHS ajustées avec les mains gauche et droite, 2) en comparant deux conditions d'exploration haptique et 3) en évaluant l'importance de la position initiale dans ces différentes conditions.

Méthodes

Participants

Treize participants sains ont été inclus dans l'étude, cinq gauchers (âge moyen \pm écart-type = $23,1 \pm 1,2$ ans) et 8 droitiers ($24,2 \pm 2,4$ ans).

Matériel

Voir la partie «Méthodologie générale» au début de la partie «Contributions expérimentales»

Procédure

Les participants doivent aligner la barre avec la VG dans deux modes d'exploration (E). Dans le mode sans exploration (SE), les ajustements sont réalisés en tenant la barre uniquement par le centre. Dans le mode avec exploration (AE), les participants peuvent explorer librement la barre par des déplacements de la main. Par ailleurs, les ajustements sont réalisés soit avec la main (M) droite (MD), soit avec la main gauche (MG). La position initiale de la barre (B) change à chaque essai : les positions retenues sont -45° , $-22,5^\circ$, 0° , $22,5^\circ$ et 45° . La mesure est répétée quatre fois (répétition : R) pour chaque position initiale. Les participants réalisent donc quatre essais pour chacune des cinq positions initiales, dans les deux modes d'exploration et avec chaque main, soit un total de 80 essais ($2M*2E*5B*4R$). Les effets d'ordre sont contrebalancés.

Analyses statistiques

L'analyse de la variance, réalisée sur l'erreur constante, prend en compte la préférence manuelle comme variable inter-sujets et la main utilisée, le mode d'exploration, et la position initiale de la barre comme variables intra-sujets. Par ailleurs, des contrastes sont réalisés afin de vérifier l'hypothèse de linéarité de l'effet de la position initiale dans les différentes conditions expérimentales.

Résultats

L'analyse montre qu'en moyenne les performances ne diffèrent pas de zéro ($0,25^\circ \pm 4,48$; $F(1,11) = 0,16$; $p = 0,698$). Par ailleurs, l'analyse ne met pas en évidence de différence entre les deux groupes ($F(1,11) = 0,09$, $p = 0,761$), indiquant par là que les performances sont proches de la VG quelle que soit la préférence manuelle ($0,38^\circ \pm 0,66^\circ$ chez les droitiers et $0,05^\circ \pm 0,84^\circ$ chez les gauchers). Les interactions groupe*exploration ($F(1, 11) = 0,91$; $p = 0,361$), groupe*main utilisée ($F(1, 11) = 0,12$; $p = 0,731$) et groupe*position initiale de la barre ($F(4, 44) = 0,82$; $p = 0,515$) ne sont pas significatives.

La suite de l'analyse montre un effet de la main utilisée ($F(1, 11) = 17,78$; $p = 0,001$) : la déviation est dans le sens anti-horaire avec la main gauche ($-1,70^\circ \pm 0,66^\circ$) et dans le sens horaire avec la main droite ($2,12^\circ \pm 0,74^\circ$). L'effet de la main utilisée ne dépend pas de la position initiale de la barre ($F(4, 44) = 1,74$; $p = 0,159$).

En revanche, l'effet principal de la position initiale de la barre ($F(4, 44) = 10,42$; $p < 0,001$) est significatif : les performances sont davantage déviées dans le sens horaire quand la barre est initialement placée à $+45^\circ$ et davantage déviées dans le sens anti-horaire quand la barre est initialement placée à -45° . Entre ces 2 extrémités, les performances sont caractérisées par un gradient : $-1,24^\circ$, $-0,30^\circ$, $+0,24^\circ$, $+0,91^\circ$, et $+1,47^\circ$, pour les positions initiales -45° , $-22,5^\circ$, 0° , $+22,5^\circ$ et $+45^\circ$, respectivement.

Une seconde ANOVA est réalisée afin de tester l'effet de l'exploration. Pour cette analyse, en raison de l'inversion des déviations entre les mains droites et gauches, le signe des données obtenues avec la main gauche est inversé. L'effet du mode d'exploration se révèle significatif ($F(1, 11) = 13,03$; $p = 0,004$) : les performances obtenues avec exploration ($1,06^\circ$) sont plus proches de la VG que celles obtenues sans exploration ($2,76^\circ$).

Des contrastes sont réalisés afin de tester l'effet de la position initiale de la barre en fonction de la main utilisée et du mode d'exploration (figure 1). Dans la condition MD*AE, le contraste linéaire

est significatif ($F(1, 11) = 12,24$; $p = 0,005$) et explique 98,0 % de la variance. De même, dans la condition MD*SE, ce contraste ($F(1, 11) = 12,17$; $p = 0,005$) explique 93,5 % de la variance et dans la condition MG*SE ($F(1, 11) = 17,76$; $p = 0,001$), 97,1 % de la variance est expliquée par le contraste linéaire. En revanche, dans la condition MG*AE, le contraste linéaire n'est pas significatif ($F(1, 11) = 1,58$; $p = 0,233$) : les performances ne diffèrent pas d'une position initiale à l'autre. Les pentes mesurées dans chacune de ces 4 conditions ont été comparées entre elles. Dans la condition MG*AE, la pente est de 1,01%. Dans les conditions MG*SE, MD*AE et MD*SE, les pentes sont respectivement de 3,31%, 3,73% et 3,74%. Les tests réalisés sur ces pentes montrent que MG*AE diffère significativement de MG*SE ($F(1, 11) = 6,64$; $p = 0,026$), de MD*AE ($F(1, 11) = 8,58$; $p = 0,014$) et de MD*SE ($F(1, 11) = 9,86$; $p = 0,009$). Au contraire, les différences de pentes entre MD*AE et MD*SE ($F(1, 11) < 0,01$; $p = 0,995$), entre MD*SE et MG*SE ($F(1, 11) = 0,24$; $p = 0,635$) et entre MD*AE et MG*SE ($F(1, 11) = 0,11$; $p = 0,741$) ne sont pas significatives.

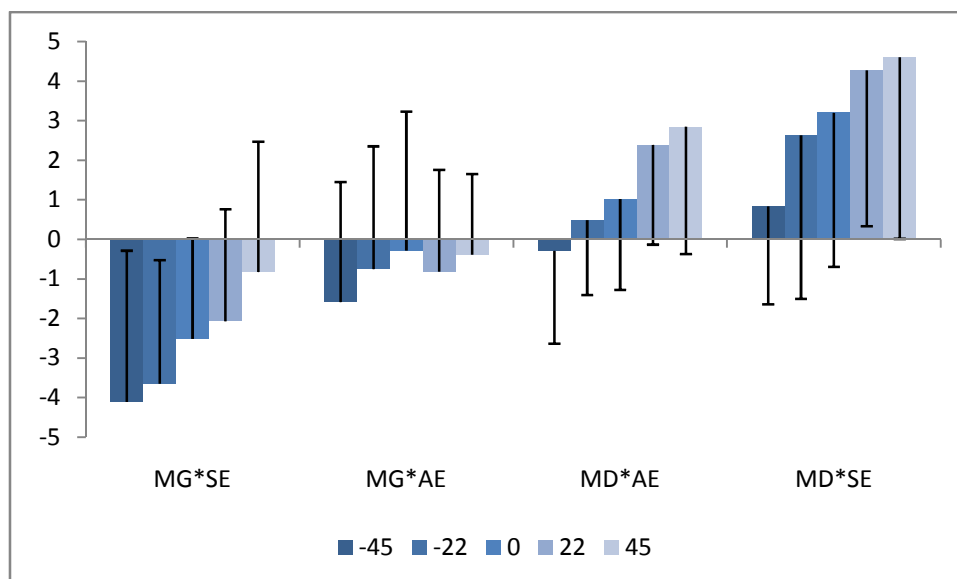


Figure 2.19 : Verticale haptique subjective en fonction de la main utilisée, du mode d'exploration et de la position initiale de la barre. Moyennes des déviations (en degrés) avec la main gauche (MG) ou droite (MD) et avec (AE) ou sans exploration (SE) en fonction des différentes positions initiales de la barre.

Discussion

Dans cette étude, des participants sains droitiers et gauchers devaient ajuster une barre avec la verticale gravitaire, les yeux bandés, avec la main gauche ou la main droite. Ils pouvaient explorer librement la barre pour réaliser les ajustements ou devaient la tenir en son centre sans l'explorer. L'analyse ne montre aucune différence entre les droitiers et les gauchers. En revanche, les performances diffèrent en fonction de la main utilisée lors des ajustements : la VHS est déviée du côté de cette main. De plus, les performances diffèrent en fonction du mode d'exploration : la déviation est plus importante dans la condition sans exploration. Enfin, les résultats indiquent une déviation des ajustements en direction de la position initiale, sauf quand les performances sont réalisées avec la main gauche et avec exploration.

Le premier résultat indique une absence de différence entre les gauchers et les droitiers dans la mesure de la VHS. La préférence manuelle ne semble donc pas déterminante dans cette compétence spatiale.

Le second résultat montre que la VHS diffère en fonction de la main utilisée. La VHS moyenne obtenue avec la main droite est déviée dans le sens horaire d'environ $2,1^\circ$ alors que la VHS obtenue avec la main gauche est déviée dans le sens anti-horaire d'environ $-1,7^\circ$. Dans l'étude plus ancienne de Bauermeister *et al.* (1964), des participants sains jeunes devaient placer une barre à la verticale dans différentes inclinaisons du corps, avec la main droite, avec la main gauche ou avec les deux. Les résultats indiquaient une déviation dans le sens anti-horaire avec la main droite par rapport aux performances obtenues avec les deux mains. Des déviations dans le sens horaire étaient observées avec la main gauche. La symétrie des performances obtenues avec la main gauche et la main droite est confirmée dans notre étude, mais le sens des déviations est inverse de celui observé dans l'étude de Bauermeister *et al.* (1964). Aucune donnée actuelle ne nous permet d'interpréter cette différence de résultats : en effet, nous n'avons pas d'information sur la consigne donnée ou sur le mode d'exploration utilisé lors de l'ajustement dans l'étude de Bauermeister *et al.* (1964). Quoi qu'il en

soit, ces différences montrent qu'il est important de prendre en considération cet aspect et de préciser dans la méthodologie quelle main est utilisée. De plus, l'analyse indique une erreur minime si l'on moyenne les données des deux mains. Ceci signifie qu'une absence de déviation de la VHS peut être diagnostiquée si un nombre égal d'essais est réalisé avec les mains gauche et droite, non différenciées par la suite. Au contraire, une déviation de la VHS peut être observée si les conditions imposent l'utilisation exclusive d'une main. Par exemple, l'étude de la VHS chez les patients cérébro-lésés est réalisée avec la main ipsilésionnelle. La littérature montre une déviation anti-horaire de la VHS chez les patients cérébro-lésés droits avec des signes de négligence (Braem *et al.*, 2011 ; Funk *et al.*, 2010a). Nos données permettent de prévoir une amplification de la déviation de la VHS avec la main gauche, lorsque son utilisation est possible. La VHS n'est pas la seule mesure spatiale à être influencée par la main utilisée : des résultats similaires sont retrouvés dans la perception du droit devant subjectif haptique (DDSH). La mesure de ce DDSH est réalisée en demandant aux participants de placer le doigt sur la « ligne imaginaire qui part du nombril et qui se prolonge droit devant ». Chokron *et al.* (2004) montrent que dans une tâche active de DDSH, les performances moyennes sont déviées vers la droite quand les participants utilisent la main droite, et inversement quand ils utilisent la main gauche.

Le troisième résultat indique que les déviations vers la main utilisée sont plus importantes dans le mode SE que dans le mode AE. Il est également important de prendre en considération ce point car il suggère une utilisation différente des informations sensorielles. En effet, dans le mode AE, il est probable que les mouvements de l'articulation de l'épaule apportent une source d'informations supplémentaires concernant la verticalité et que cette activité supplémentaire permette de se rapprocher de la verticale gravitaire. En revanche, l'absence d'interaction entre la position initiale de la barre et le mode d'exploration indique que la présence de ces informations supplémentaires ne permet pas d'estimer correctement la position initiale de la barre.

Le quatrième résultat montre que les valeurs de la VHS dépendent fortement de la position initiale

de la barre. Comme dans l'étude de Chokron (2004) sur le DDSH, la déviation vers la gauche la plus importante est observée quand les performances sont réalisées avec la main gauche, avec un départ à gauche (-45°), et la déviation vers la droite la plus importante est observée quand les performances sont réalisées avec la main droite, avec un départ à droite (45°). En ce qui concerne la déviation de la VS vers les positions initiales de la barre, d'autres études ont permis de mettre en évidence de tels biais dans la modalité visuelle mais pas de manière systématique. Des différences de méthodologie peuvent être la cause de ces différences de résultats. Par exemple, Werner et Wapner (1952) ont montré que la position de départ de la barre pouvait avoir un effet significatif sur la VVS. Dans leur étude, les participants réalisent consécutivement 10 essais avec la même position initiale de la barre. Puis, après une pause de 2 minutes, 10 nouveaux essais sont réalisés avec une nouvelle orientation initiale de la barre. Les auteurs supposent que l'effet de la position initiale de la barre est un effet adaptatif. L'exposition répétée à la même inclinaison initiale de la barre modifierait la représentation du corps, et la représentation corporelle serait déviée dans le sens opposé à la déviation initiale de la barre. Il en résulterait une déviation de la VVS opposée à la déviation représentée du corps. Cette hypothèse est compatible avec l'effet E décrit précédemment. Plus récemment, Hoppenbrouwers *et al* (2004) ont montré que l'effet E disparaît quand la barre est initialement placée parallèlement à l'orientation de la tête. Ces auteurs supposent qu'une estimation correcte de la position initiale de la barre est nécessaire pour effectuer les ajustements. Quand la barre est initialement placée parallèlement à l'orientation de la tête, un pattern de reconnaissance visuelle d'alignement s'activerait, alors que dans la condition non parallèle, l'estimation de la position initiale de la barre serait incorrecte et entraînerait une erreur. Cependant, d'autres travaux ne retrouvent pas cet effet (cf. Taguchi *et al.*, 1995). Des résultats récents (Braem *et al.*, 2009 ; Braem *et al.*, 2011) suggèrent que l'effet de la position initiale de la barre n'est systématique que dans la modalité haptique, et même qu'il est inexistant dans les modalités visuelles et visuo-haptiques. Dans cette étude cependant, la position initiale varie d'un essai à l'autre, ce qui

expliquerait la divergence avec l'étude ancienne de Werner et Wapner (1952). Afin de tester l'importance de la durée d'exposition à la position initiale de la barre, il serait utile de comparer la VVS dans deux conditions différentes : dans la première, le participant déplacerait la barre immédiatement après ouverture des yeux, alors que dans l'autre, le participant devrait attendre quelques secondes avant de procéder à l'ajustement. Par ailleurs, la tête est droite dans l'étude de Braem *et al.*, (2009 et 2011), et on peut penser que, dans cette posture, les positions initiales sont correctement perçues par le système visuel, ce qui expliquerait la différence de résultats par rapport à l'étude de Hoppenbrouwers *et al.*, (2004). L'effet de la position initiale de la barre dans la modalité haptique résulterait donc d'une mauvaise estimation de cette position. Afin de tester cette hypothèse, une étude complémentaire pourrait consister à proposer à des participants d'estimer cette position oralement en la comparant par exemple à des valeurs d'orientations connues (l'aiguille des heures par exemple).

Enfin, il faut noter la quasi-absence de pente dans la condition main gauche avec exploration, contrastant avec les pentes mesurées dans les autres conditions sont importantes. Dans l'étude de Bauermeister *et al.* (1964) également, les performances obtenues avec la main gauche sont proches de la verticale objective quand les participants ne sont pas inclinés, alors que les performances avec la main droite sont déviées dans le sens anti-horaire. Ces résultats sont compatibles avec l'idée que l'hémisphère droit est davantage spécialisé dans le traitement des informations spatiales et permet des évaluations spatiales plus précises en particulier quand la réponse motrice concerne le même hémisphère. Dans l'étude de la représentation de la référence égocentrique, d'autres auteurs (Sampaio *et al.*, 1992) déclarent également que les meilleures performances obtenues avec la main gauche sont le reflet de la prédominance hémisphérique droite dans le traitement des informations spatiales.

En conclusion, la VHS ne paraît pas dépendre de la préférence manuelle des participants

mais les performances dévient vers la main utilisée. Par ailleurs, les déviations sont plus importantes quand la méthodologie ne permet pas l'exploration de la barre. De plus, une déviation systématique de la VHS en direction de la position initiale de la barre est retrouvée, sauf avec la main gauche et avec exploration indiquant ainsi une possible supériorité de l'hémisphère cérébral droit dans la perception de la verticale. Une standardisation de cette épreuve pourrait être envisagée afin de pouvoir comparer objectivement les mesures de la VHS. Etant donné que les participants disaient éprouver moins de difficultés dans la condition AE, et que le temps de réalisation était sensiblement plus long dans la condition SE, il semble que la condition avec exploration soit la plus adaptée pour une utilisation rapide en clinique (évaluation de la VHS chez les patients avec une atteinte vestibulaire par exemple). Par ailleurs, un nombre égal d'essais réalisés avec la main gauche et la main droite est nécessaire pour éviter de conclure, à tort, à une déviation de la VHS. Enfin, pour compenser un probable effet de la position initiale de la barre, cette position doit être variée dans les sens horaire et anti-horaire de manière égale. Pour finir, le problème de l'évaluation des patients cérébro-lésés, généralement hémiplegiques, reste posé jusqu'à ce qu'une étude parvienne à proposer une comparaison de leurs performances avec les mains contra et ipsi-lésionnelles.

Etude VI : Effet de l'âge sur la perception de la verticale subjective haptique

Résumé

Chez le sujet sain, la perception de l'espace est précise. En particulier, la perception de la verticale (verticale subjective ou VS) et la perception du droit devant soit (DDS) sont, dans des conditions optimales, proche des mesures de référence. Une méta-analyse d'études évaluant la bissection de ligne indique que des différences sont observées entre des participants sains jeunes et âgés. Le but de cette étude est d'évaluer l'effet de l'âge dans la VS. Vingt neuf participants droitiers sains, 21 jeunes (23 ± 2 ans) et 8 participants plus âgés (53 ± 7 ans), assis dans l'obscurité, devaient aligner une barre initialement inclinée à 45° dans le sens horaire et anti-horaire avec la verticale gravitaire dans les modalités visuelles (barre lumineuse) et haptiques (barre tenue par le centre). Une moyenne est calculée par modalité et par condition initiale. En moyenne, la VS n'est pas différente de la verticale gravitaire ($p = 0,91$), mais l'effet du groupe ($F_{1, 27} = 20,19$; $p < 0,01$) et l'interaction avec la modalité ($F_{1, 27} = 18,39$; $p < 0,01$) sont significatifs. Par ailleurs, l'influence de la position initiale de la barre n'est observée que dans la modalité haptique ($F_{1, 27} = 65,24$; $p < 0,01$). Les résultats indiquent une absence de différence entre les groupes dans la VVS, sans influence de la position initiale (participants jeunes : $VVS_{-45^\circ} = -0,16^\circ$; $VVS_{+45^\circ} = 0,17^\circ$ - participants âgés : $VVS_{-45^\circ} = -0,44^\circ$; $VVS_{+45^\circ} = 0,05^\circ$). Au contraire, les performances sont déviées dans le sens de la position initiale dans la VHS, avec une déviation horaire pour les participants jeunes ($VHS_{-45^\circ} = 0,92^\circ$; $VHS_{+45^\circ} = 5,54^\circ$) et une déviation anti-horaire pour les participants plus âgés ($VHS_{-45^\circ} = -6,76^\circ$; $VHS_{+45^\circ} = 0,37^\circ$). Comme le droit devant subjectif, la verticale subjective change en fonction de l'âge. Cependant, seules les performances de la modalité haptique ne sont concernées. Cette modalité, sensible aux positions initiales de la barre s'inverse avec l'âge.

Introduction

La perception de la verticale est généralement précise chez les participants sains (Mann, 1952), chez les participants jeunes (Luyat *et al.*, 1997 ; études 2 de ce travail de thèse) mais également chez participants plus âgés (Saj *et al.*, 2005a ; études 1 de ce travail de thèse). Ces deux populations sont rarement comparées, car les participants les plus jeunes sont généralement évalués pour tester des hypothèses théoriques alors que les plus âgés sont plus souvent évalués pour comparer les performances de patients présentant des troubles visuo-spatiaux.

Une méta-analyse récente montre, dans l'évaluation de la bissection de ligne, une différence significative entre les participants jeunes et plus âgés : les jeunes présentent une déviation vers la gauche alors que les participants plus âgés dévient vers la droite par rapport au centre objectif des lignes (Jewell et Mc Court, 2000). A notre connaissance, aucune étude n'a évalué l'effet de l'âge dans la perception de la verticale.

La perception de la verticale est généralement évaluée dans la modalité visuelle et haptique. Dans la première, la méthode consiste à ramener à la verticale une barre lumineuse initialement inclinée au moyen d'une manette ou d'un joystick. Dans la seconde modalité, les participants utilisent leur main, généralement dominante, pour ramener la barre à la verticale. Dans la modalité visuelle, une déviation de $\pm 2,5^\circ$ est considérée comme normale alors que dans la modalité haptique, une déviation de $\pm 4,5^\circ$ est considérée comme normale (Pérennou *et al.*, 2008). La différence peut être attribuée à la pauvreté de la modalité haptique dans l'estimation des propriétés spatiales (Lederman et Klatzky, 1993). De plus la modalité visuelle est considérée comme plus précise dans l'estimation des propriétés intrinsèques des objets.

Le but de cette étude est d'évaluer l'effet de l'âge sur la perception de la verticale dans les modalités visuelles et haptique dans deux populations qui diffèrent par l'âge.

Méthodes

Participants

Vingt et un participants sains jeunes (23 ± 2 ans) et huit participants sains plus âgés (52 ± 7 ans) ont participé à l'étude après avoir signé un consentement éclairé. Ils étaient tous droitiers et avaient tous une vue normale ou corrigée. Aucun ne souffrait de troubles neurologiques, psychiatriques, n'avait de trouble de l'équilibre ou d'autres troubles sensoriels ou moteurs.

Matériel

Voir la partie «Méthodologie générale» au début de la partie «Contributions expérimentales»

Procédure

Les participants devaient aligner la barre avec la VG dans deux modalités (M). Dans la modalité visuelle (VVS), les participants ajustaient la barre par le biais d'ordres verbaux donnés à l'expérimentateur, à savoir, le haut de la barre vers la droite ou vers la gauche. Dans la modalité haptique (VHS) les participants tenaient la barre par le centre uniquement, avec la main droite. La position initiale de la barre (B) change à chaque essai : les positions retenues sont -45° et $+45^\circ$. La mesure est répétée deux fois (répétition : R) pour chaque position initiale. Les participants réalisaient donc un total de 16 essais ($2M \times 2B \times 2R$). Les effets d'ordre sont contrebalancés.

Analyses statistiques

L'analyse de la variance, réalisée sur l'erreur constante, prend en compte l'âge des participants comme variable inter-sujets et la modalité, la position initiale de la barre et la répétition comme variables intra-sujets.

Résultats

L'analyse de variance réalisée sur les valeurs brutes montre un effet du groupe ($F_{1, 27} = 20,34$; $p < 0,01$) : les performances pour les participants jeunes sont horaires ($1,51^\circ \pm 3,86^\circ$) alors que celles des participants âgés sont anti-horaires ($-1,69^\circ \pm 4,19^\circ$). Il n'y a pas d'effet de la modalité ($F_{1, 27} = 0,03$; $p = 0,86$) mais un effet de la position initiale de la barre ($F_{1, 27} = 42,39$; $p < 0,01$). Par ailleurs, la modalité modifie les performances en fonction du groupe ($F_{1, 27} = 22,49$; $p < 0,01$) : les performances sont proches de la verticale gravitaire dans la modalité visuelle pour les deux groupes ($-0,11^\circ \pm 1,31^\circ$ pour les jeunes et $-0,19^\circ \pm 1,29^\circ$ pour les plus âgés) mais les performances dans la modalité haptique sont déviées dans le sens horaire pour les participants jeunes ($3,13^\circ \pm 4,78^\circ$) et dans le sens anti-horaire pour les participants plus âgés ($-3,19^\circ \pm 5,42^\circ$). Par contre la position initiale de la barre ne modifie pas les performances pour les deux groupes ($F_{1, 27} = 1,46$; $p = 0,24$) : les performances sont déviées dans le sens des positions initiales. Enfin, il y a une interaction entre la modalité et la position initiale de la barre ($F_{1, 27} = 38,92$; $p < 0,01$) sans interaction avec le groupe ($F_{1, 27} = 1,81$; $p = 0,19$) : les performances sont déviées vers les positions initiales essentiellement dans la modalité haptique avec un biais dans le sens horaire pour les participants jeunes et dans le sens anti-horaire pour les participants plus âgés.

Discussion

Le but de cette étude était de comparer la verticale subjective de deux populations de participants sains mais différentes par l'âge. Un groupe avait environ 23 ans et le second était plus âgé (environ 52 ans). Les deux groupes devaient aligner une barre avec la verticale gravitaire dans les modalités visuelle et haptique. Dans la modalité visuelle, les performances sont proches de la verticale gravitaire et ne diffèrent pas en fonction de l'âge ou de la position initiale de la barre. Au contraire, dans la modalité haptique, les performances sont en moyenne déviées dans le sens horaire

pour le groupe des participants jeunes et dans le sens anti horaire pour le groupe des participants plus âgés. De plus, dans cette modalité, les performances sont systématiquement déviées dans le sens de la position initiale.

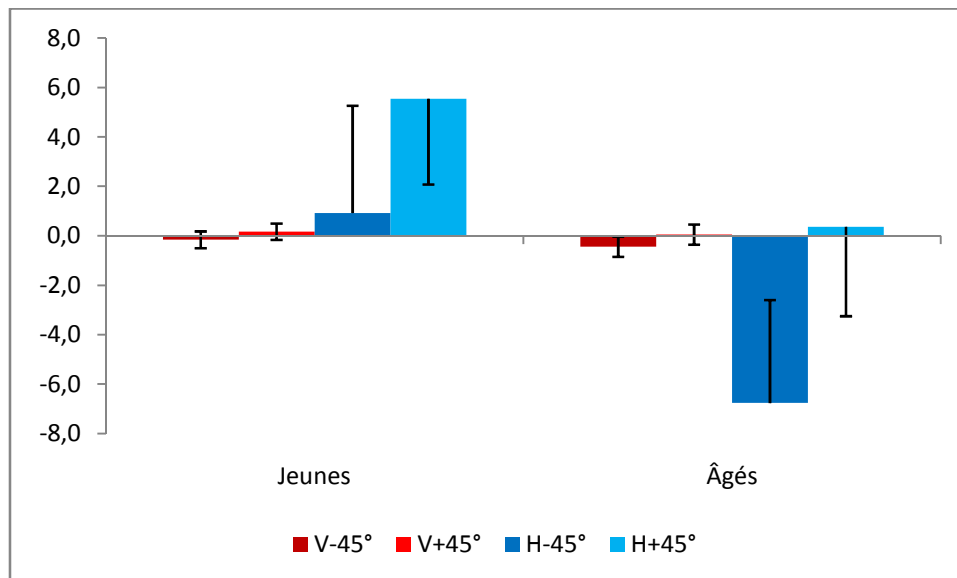


Figure 2.20 : Moyennes de la verticale subjective en fonction de la modalité, de la position initiale de la barre et du groupe de participants.

Dans la modalité visuelle, les estimations de la verticale sont proches de la verticale gravitaire. Ce résultat confirme les données des études précédentes qui montrent que cette estimation est précise (Mann, 1952). Les participants jeunes et plus âgés ne sont pas différents dans cette tâche alors que dans une tâche de bissection de ligne, les participants sains d'âge différents ont des performances opposées, à gauche du centre objectif pour les participants les plus jeunes, à droite du centre objectif pour les participants plus âgés (Jewel et McCourt, 2000). Alors que ces auteurs supposent un vieillissement de la balance inter-hémisphérique responsable d'une diminution de l'attention latéralisée, il semble, au regard de nos nouveaux résultats que la tâche de perception de la verticale ne soit pas affectée par ce vieillissement.

Dans la modalité haptique au contraire, une différence est mise en évidence : les participants jeunes

présentent une déviation horaire alors que les participants plus âgés présentent une déviation anti-horaire. Cette différence n'est pas retrouvée dans la littérature et aucune étude, à notre connaissance, ne fait référence à une possible différence de performance entre des participants jeunes et plus âgés dans la perception de la verticale. L'étude de Jewel et McCourt (2000) montre bien une différence dans une tâche de bissection de ligne, en modalité visuo-haptique. La restriction de l'exploration de la barre dans cette étude ne semble pas être la cause de cet effet, puisque l'exploration diminue d'environ $1,5^\circ$ les déviations observées, mais ne modifie pas le sens de la déviation (étude 5 de ce travail). L'utilisation exclusive de la main droite ne peut pas non plus expliquer cette différence puisque les résultats précédents montrent un effet symétrique entre les deux mains chez les participants sains jeunes (étude 5 de ce travail). Nous pouvons donc poser d'autres hypothèses, qui ne reposent que sur des observations cliniques. Dans la position restreinte de cette étude, quand les participants déplacent la barre, le poignet est en mouvement, mais l'articulation de l'épaule se déplace également. Les participants plus âgés présentent une moins bonne sensibilité vestibulaire et somesthésique (Lord et Webster, 1990) qui pourrait être responsable de la mauvaise estimation finale de la position de la main. Cependant, les performances entre les participants sains jeunes et âgés sont presque symétriques, et il semble donc également que les plus jeunes aient également une mauvaise estimation finale de la position de leur main. D'ailleurs, en réalisant les mesures dans condition haptique, j'ai à plusieurs reprises fait l'expérience de demandé aux participants de mettre la barre à la verticale sans modifier leur réponse précédente et sans leur signaler. A chaque fois, ils reprenaient la barre et la déplaçaient à nouveau sans avoir conscience que la position initiale était la même que la position finale précédente. Il serait intéressant de réitérer cette expérience, de manière plus fine afin d'en obtenir des conclusions plus objectives.

Un autre point à discuter dans cette étude est la déviation systématique des performances dans le sens de la position initiale de la barre dans la modalité haptique. Cet effet n'est généralement pas évalué et nous en avons fait une discussion dans l'étude 5 de ce travail. Nous pouvons ajouter

cependant que cet effet linéaire ne semble pas fonctionner comme l'effet cadre observé quand les participants doivent aligner une barre avec la verticale gravitaire en présence d'un cadre visuel. En effet, dans ce cas là, l'effet n'est pas linéaire mais plutôt quartique (comme dans la figure 2.8 de l'étude 3 de ce travail). Dans la modalité haptique, cet effet systématique semble plus lié à une tendance à s'approcher des valeurs de référence qui correspondent ici aux valeurs initiales alors que dans la modalité visuelle, cet effet peut s'expliquer plus facilement par un effet cadre, en absence de cadre. La perception de la position initiale de la barre agirait comme la perception du cadre visuelle en particulier quand la position initiale est répétée et quand un délai temporel est imposé entre la perception de la barre et la possibilité de la déplacer (Werner et Wapner, 1952). Dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons pu évaluer la VVS de participants sains dans différentes conditions : dans la première, les participants déplaçaient la barre dès qu'ils la voyaient alors que dans la seconde et la troisième un délai de 5 et 10 secondes était imposé. De plus, la position initiale pouvait soit se répéter d'un essai à l'autre soit se contrebalancer. Les résultats préliminaires montrent un effet similaire à l'effet cadre dans la condition bloquée avec un délai. Des mesures sont encore à réaliser pour affiner les conclusions de cette étude. L'effet de la position initiale de la barre n'est donc pas uniquement observé dans la modalité haptique, car dans certaines conditions cet effet est retrouvé dans la modalité visuelle.

En conclusion, la perception de la verticale est précise chez les participants jeunes et plus âgés. Cependant, alors que les performances dans la modalité visuelle sont proches de la verticale gravitaires, sans effet de la position initiale de la barre, une déviation horaire est observée chez les plus jeunes alors qu'une déviation anti-horaire est observée chez les plus âgés, avec une déviation systématique vers les positions initiales de la barre. Ces données suggèrent que les études sur la perception de la verticale doivent prendre en compte de multiples facteurs pour affiner les mesures de normalité qui servent parfois dans la comparaison de patients cérébro-lésés ou présentant des troubles sensoriels.

Discussion Générale

Les objectifs de ce travail de thèse étaient d'évaluer les contributions relatives des modalités visuelle, haptique et visuo-haptique à la perception de la verticale subjective, de tester la pertinence de l'approche statistique bayésienne pour rendre compte de cette intégration, et de comparer les performances de participants sains jeunes et âgés avec celles de patients cérébro-lésés avec ou sans troubles visuo-spatiaux. Enfin, les conditions d'évaluation de la verticale subjective dans la modalité haptique ont été étudiées afin de déterminer l'origine de la variabilité importante généralement observée dans cette modalité.

La verticale subjective

Participants sains

Dans la littérature, la verticale visuelle subjective est en moyenne proche de la verticale gravitaire chez les participants sains (Mann, 1952 ; Witkin et Asch, 1948b). Selon Pérennou *et al.* (2008), la VVS serait comprise entre $\pm 2,5^\circ$ chez ces personnes. Nos résultats montrent des performances proches de ces valeurs de normalité, avec une VVS à $0,01^\circ \pm 0,99^\circ$ pour les participants sains jeunes (étude 2), c'est-à-dire comprise dans un intervalle de $\pm 2,0^\circ$ avec le mode de calcul (moyenne ± 2 écarts-types) de Pérennou *et al.* (2008). La verticale visuo-haptique subjective, également proche de la verticale gravitaire, ne diffère pas de la VVS. Il n'existe pas de valeurs de référence publiées pour cette modalité. Nos résultats montrent une VVHS à $0,04^\circ \pm 0,92^\circ$ pour les participants sains jeunes (étude 2), soit un intervalle de $\pm 2,0^\circ$ avec la même méthode de calcul que précédemment. Au final, nos résultats indiquent donc que les valeurs normales de la VVS et de la VVHS sont dans un intervalle similaire. Ceci suggère que les informations disponibles dans la modalité d'évaluation visuelle prédominent dans la condition bimodale visuo-haptique. Un avantage de cette modalité est la facilité de mise en œuvre par rapport à une modalité visuelle où les déplacements de la barre sont indiqués verbalement par le participant et exécutés par

l'expérimentateur. Un autre point important est une augmentation de la précision, c'est-à-dire une diminution de l'erreur variable par rapport à la modalité visuelle. Dans le cadre du modèle proposé par Ernst et Banks (2002), cette diminution est le résultat de l'intégration des informations sensorielles mises en jeu dans les modalités visuelle et haptique.

La verticale subjective haptique est également proche de la verticale gravitaire chez les participants sains, mais son erreur variable est plus importante que celles des verticales subjectives mesurée dans les modalités visuelle et visuo-haptique. Des précisions sont néanmoins à apporter. Sa valeur moyenne serait comprise entre $\pm 4,5^\circ$ (Pérennou *et al.*, 2008). Nos données montrent une VHS de $0,25^\circ \pm 4,48^\circ$, c'est-à-dire des valeurs comprises dans un intervalle de $\pm 9^\circ$ (étude 5) lorsque les résultats prennent en compte la moyenne des performances obtenues avec la main droite et la main gauche. Nos données confirment l'augmentation de l'intervalle de normalité dans la modalité haptique, mais ne confirment pas l'intervalle proposé par Pérennou *et al.* (2008). Dans leur étude, 23 participants réalisaient la tâche avec la main droite et 10 participants réalisaient la tâche avec la main gauche. Dans notre étude, les treize participants réalisaient la tâche avec la main droite et avec la main gauche. Les détails de notre analyse montrent que les estimations de la VHS sont comprises entre environ -3° et 0° avec la main gauche et entre 0° et $+3^\circ$ avec la main droite. Les intervalles diffèrent donc considérablement en fonction de la main utilisée et cette notion doit être prise en considération, surtout lors de l'évaluation de la VHS chez les patients cérébro-lésés qui présentent souvent une hémiplégie. L'augmentation de cet intervalle par rapport aux modalités visuelle et visuo-haptique peut s'expliquer par les effets combinés de la main utilisée lors des ajustements, du mode d'exploration et de la position initiale de la barre. Seul le troisième effet est observé dans les modalités visuelle et visuo-haptique et il faut ajouter qu'il est très faible : on observe une pente (estimation de la droite de régression linéaire entre les valeurs des positions initiales et les estimations de la verticale subjective) de 0,004 et de 0,001 respectivement dans les modalités visuelle et visuo-haptique alors qu'elle est de 0,05 dans la modalité haptique, c'est-à-dire

10 et 50 fois plus importante. Cette différence peut s'expliquer par la supériorité de la modalité visuelle pour l'évaluation des propriétés spatiales des objets alors que la modalité haptique est plutôt spécifique dans l'évaluation de leurs propriétés matérielles, au sens de Lederman et Klatzky (1993).

Peu d'études par ailleurs se sont intéressées à cet effet de la position initiale de la barre. A notre connaissance, Pagarkar *et al.* (2008) ont récemment évalué l'effet des conditions initiales sur la VVS (et également sur la perception de l'horizontale). Dans leur étude, 17 participants sains (âge moyen 35 ans) devaient aligner une barre avec la verticale gravitaire et l'angle de départ variait au cours des 12 essais. L'analyse révèle un effet des conditions initiales : la verticale subjective tend à être négative (anti-horaire) quand la position initiale de la barre est anti-horaire. Les auteurs n'indiquent pas comment évolue cet effet en fonction de la valeur de l'angle de départ. Ils l'expliquent par une torsion oculaire lors du déplacement de la barre mais aucune mesure de torsion n'a été réalisée. Dans notre étude, l'effet de position initiale, présent dans les trois modalités, est le plus important dans la modalité haptique, pour laquelle une explication en termes de torsion oculaire est peu plausible. Cet effet est linéaire, c'est-à-dire proportionnel à la position de départ, dans les trois modalités. Baccini *et al.* (2014) confirment la linéarité de l'effet des conditions initiales sur la VVS. Cet effet ne peut pas être expliqué par un effet cadre car ce dernier est caractérisé par un effet quartique, avec une augmentation de l'effet pour les cadres à 18° par rapport aux cadres à 28° (Beh *et al.*, 1971). L'effet linéaire que nous observons semble donc davantage lié à une tendance à s'approcher des valeurs de référence qui correspondent ici aux valeurs initiales. Une autre différence avec l'effet-cadre est le nombre de participants concernés. Trente % de la population sont influencés par un cadre visuel (Crémieux et Mesure, 1994) alors que dans nos études, l'effet concerne l'ensemble des participants.

Effet de l'âge

L'étude récente de Baccini (2014) a aussi évalué l'effet de l'âge (et du genre) sur la VVS. Leur premier objectif était de comparer deux méthodes d'évaluation de la VVS : une méthode de choix forcé et une méthode d'ajustement. Leur données ne montrent pas d'effet de la méthode mais montrent que la position initiale de la barre entraîne une déviation de la VVS analogue à celle que nous avons décrite, mais légèrement plus marqué pour des participants plus âgés. Nos résultats dans la modalité visuelle ne confirment pas la déviation de la VVS observée par Baccini *et al.* (2014), mais l'aspect méthodologique peut être mis en cause. En effet, dans notre étude 6, les valeurs de départ étaient -45° et $+45^\circ$ alors que celles de Baccini *et al.* (2014) variaient entre $\pm 12^\circ$. On ne peut exclure que les participants soient davantage sensibles aux conditions de départ pour des petits angles. Cet effet peut rejoindre celui observé avec l'effet cadre pour lequel les déviations vers le cadre sont observées, plus encore pour les petites inclinaisons du cadre (18°) que pour les grandes inclinaisons (28°). Par ailleurs, dans la modalité visuelle, nos données ne montrent pas de différence entre les estimations des participants jeunes et plus âgés.

Dans la modalité haptique, l'effet de l'âge est au contraire très important. Nos résultats montrent, avec un ajustement réalisé avec la main droite, une VHS horaire d'environ 3° pour les participants jeunes et une VHS anti-horaire d'environ 3° pour les participants plus âgés. Ni l'utilisation de la main, ni le manque d'exploration (effets évalués dans l'étude 5) n'explique cette différence. Les données de Lord et Webster (1990) suggèrent une diminution des sensibilités vestibulaire, visuelle et somesthésique, et peuvent expliquer la différence observée entre les participants jeunes et plus âgés bien que cette différence ne soit pas observée dans la modalité visuelle. En revanche, la déviation des participants sains jeunes, pour laquelle nous avons suggéré un effet des contraintes anatomiques de la main, ne trouve pas d'explication réellement satisfaisante.

Effet d'un cadre visuel

L'étude 3 de ce travail de thèse évaluait les VVS et VVHS en présence d'un cadre visuel chez les participants sains. Le protocole n'était pas celui communément utilisé, comme le RFT. Notre procédure consistait à éclairer avec une lumière noire un cadre blanc, placé autour du disque, orienté à 0° , $\pm 18^\circ$ et $\pm 28^\circ$ (Figure 2.6). Notre étude diffère donc d'autres (par exemple Luyat *et al.*, 1997) par la présence d'un cadre à 0° . En effet, généralement, la différence est réalisée entre les performances avec et sans cadre (Beh *et al.*, 1971 ; Luyat *et al.*, 1997). De plus, le critère de dépendance est la présence d'une déviation de plus de 5° entre les performances avec et avec un cadre incliné à 18° . Nous n'avons pas respecté ce critère en raison des déviations plus petites qu'attendues et nous avons choisi de mesurer la différence entre les performances avec un cadre à -18° et à $+18^\circ$. Au final, nos résultats sont proches de ceux de la littérature, avec un effet cadre plus important observé pour les cadres à $\pm 18^\circ$ par rapport aux cadres à $\pm 28^\circ$. Même si elle nécessiterait un nombre plus important de participants, les premiers résultats de cette étude sont conformes à ceux attendus et valident notre matériel et notre procédure. De plus, elle nous a permis de montrer pour la première fois que la modalité visuo-haptique était sensible à la présence d'un cadre visuel incliné, de la même manière que la modalité visuelle. On peut supposer que les participants dépendants intègrent les informations visuelles altérées et que les informations haptiques inchangées ne permettent pas de compenser la déviation provoquée.

Effet des lésions cérébrales

Les données de la littérature montrent une déviation anti-horaire des verticales subjectives, avec une aggravation en cas de négligence spatiale et d'hémianopsie. Nos résultats confirment la déviation antihoraire de la VVS chez les patients cérébro-lésés (Kerkhoff, 1999) avec une

aggravation en présence d'une négligence, et en présence d'une hémianopsie. L'effet cumulatif en présence des deux troubles (Saj *et al.*, 2012a) est également retrouvé dans nos résultats.

Nos résultats confirment aussi la déviation antihoraire de la VVHS chez les patients cérébro-lésés (*e.g.* Saj *et al.*, 2005a) avec une aggravation en présence d'une négligence et en présence d'une hémianopsie. L'effet cumulatif en présence des deux troubles (Saj *et al.*, 2010) est également retrouvé. L'effet cumulatif décrit dans la VVHS (Saj *et al.*, 2012a) n'est pas systématiquement retrouvé dans d'autre tâche visuo-spatial. Par exemple, Ferber et Karnath (2001) observe une diminution de la déviation du droit devant subjectif en présence d'une négligence et d'une hémianopsie alors que Saj *et al.* (2010, 2012a) observent une aggravation de la déviation du droit devant subjectif. Cette différence semble due aux délais entre la lésion et l'inclusion utilisés. En phase aiguë, les performances des patients N+H+ sont plus déviées que celles des N+H-, alors qu'elles sont identiques en moyenne 20 jours après (Saj *et al.*, 2012b). Machner *et al.* (2009) expliquent cet effet en termes de compensation post-lésionnelle.

Nos résultats confirment enfin la déviation antihoraire de la VHS chez les patients cérébro-lésés (Funk *et al.*, 2010a) avec une aggravation en présence d'une négligence, mais également en présence d'une hémianopsie. Ce résultat suggère que la perception de la verticale repose sur une représentation interne mais également que les perturbations visuelles affectent de manière durable cette représentation. Ainsi, la présence d'une hémianopsie détériore la vision et la représentation de l'environnement en est affecté. Un point important à rappeler ici est l'effet de la main observé chez les participants sains. Nous avons montré dans la population de participants sains jeunes (étude 5) que les performances obtenues avec la main droite étaient symétriques à celles obtenues avec la main gauche. Par ailleurs, les performances réalisées avec la main droite des participants contrôles de l'étude 1 étaient déviées dans le sens anti-horaire. Nous n'avons pas évalué leurs performances avec la main gauche, mais les conclusions de l'étude 5 suggèrent que les participants sains contrôles pourraient avoir des performances déviées dans le sens horaire avec la main gauche. La question

des performances des patients cérébro-lésés pose donc le problème de la représentativité des performances, évaluées avec une seule main, quand les résultats précédents suggèrent la symétrie des performances. Nous pouvons donc supposer que les patients cérébro-lésés droits présentant une négligence spatiale pourraient avoir une VHS déviée dans le sens horaire si les performances étaient évaluées avec la main gauche. Cependant, les patients que nous avons évalués dans l'ensemble de cette thèse présentaient une hémiplégie droite et aucun n'a donc pu réaliser de mesure avec la main gauche.

Sur le plan purement clinique, la modalité visuo-haptique paraît être la meilleure modalité pour évaluer la perception de la verticale. En effet, dans la modalité haptique, jugée difficile par les participants sains et cérébro-lésés, les participants hésitent beaucoup sur le placement final de la barre. De plus, il est nécessaire de prendre la main du participant et de la placer sur la barre pour éviter l'exploration de celle-ci. Dans la modalité visuelle, jugée plus facile, les participants réclament verbalement beaucoup d'allers et retours que l'expérimentateur doit réaliser. Une solution pourrait être l'utilisation d'une manette, comme dans d'autres études, mais cette motorisation n'a pas été réalisée sur notre matériel. Dans la modalité visuo-haptique, jugée la plus facile par les participants, les critiques citées au dessus ne sont plus possible. Les participants prennent seuls la barre et la déplacent à la vitesse qu'ils le désirent, et le placement final, même quand les participants hésitent, est très rapide.

En conclusion, les différentes données suggèrent que la modalité visuelle est bien adaptée à la mesure de la verticale subjective : les performances sont proches de la verticale gravitaire, l'erreur variable est assez faible et il n'y a pas de différence de performance entre les participants jeunes et plus âgés. La déviation anti-horaire des patients cérébro-lésés droits avec un trouble visuo-spatial est retrouvée. Au contraire, la modalité haptique semble peu adaptée à la mesure de la verticale en raison de déviations importantes, qu'il est néanmoins possible de contrôler. La main

utilisée pour réaliser les performances est à contrebalancer car les performances sont généralement déviées vers la main utilisée. Les positions initiales doivent également être contrebalancées car les performances sont généralement déviées vers ses positions initiales. Enfin, les déviations varient en fonction de l'âge avec une déviation horaire pour les participants sains jeunes et une déviation anti-horaire pour les plus âgés : cela suggère qu'il est important de prendre en compte cette variable pour réaliser des normes dans la VHS. Même si les déviations de la perception de la verticale sont retrouvées dans cette modalité chez les patients cérébro-lésés avec un trouble visuo-spatiale, il est possible qu'elles ne soient que le reflet de l'effet de la main utilisée lors de la tâche chez ces patients. Enfin, nos données suggèrent que la modalité visuo-haptique est la plus facile à mettre en place, qu'elle donne des performances correspondant à celles attendues et proches de la VVS, avec une diminution de la variabilité ce qui constitue un atout non négligeable en raison de la non homogénéité des variances quand on compare les performances de patients et de participants sains. Les déviations anti-horaires sont également retrouvées chez les patients cérébro-lésés avec un trouble visuo-spatial. Par ailleurs, l'utilisation de cette modalité dans les études en imagerie médicale ne pose pas de problème particulier car l'utilisation de la main droite est contrôlée par l'hémisphère gauche et que celui-ci ne rentre pas en considération dans ces études (Rousseaux *et al.*, 2013). Cette modalité pourrait donc être utilisée plus souvent dans l'étude de la perception de la verticale chez les participants sains mais également chez les patients cérébro-lésés surtout quand on s'intéresse à l'intégration des informations sensorielles dans la construction de cette représentation.

Intégration multisensorielle

La perception de la verticale nécessite l'intégration des informations visuelles, somesthésiques et vestibulaires. Dans la littérature traitant du modèle bayésien proposé par Ernst et Banks (2002), la précision (c'est-à-dire l'erreur variable) des estimations de taille par exemple, peut

être réduite en combinant les informations visuelles et haptiques, en pondérant chaque signal sensoriel par sa précision. La littérature montre que le modèle prédit correctement les estimations bimodales pour ces deux modalités. Dans ce travail de thèse, nous voulions dans un premier temps vérifier si le modèle était applicable à la perception de la verticale visuo-haptique. Nous avons fait l'hypothèse que la tâche de VVS permettrait d'évaluer le poids des informations non exclusivement visuelles intervenant dans cette condition et que la tâche de VHS permettrait d'évaluer le poids des informations intervenant dans cette autre condition. Nous aurions pu considérer classiquement que la VVS évalue les informations vestibulaires, que la VHS évalue les informations haptiques et que le modèle d'intégration multisensorielle permet d'évaluer le poids des informations vestibulaires et haptiques dans la perception de la verticale dans la modalité visuo-haptique. Il apparaît cependant que, dans la perception de l'espace, les systèmes vestibulaire, visuel et somesthésique sont impliqués ensemble. Ainsi, la verticale visuelle subjective, qui teste essentiellement la sensibilité vestibulaire, intègre également les informations proprioceptives ainsi que des informations rétinienne. De même, il est difficile de concevoir que les informations vestibulaires ne joueraient aucun rôle dans la VHS. Nous avons donc considéré que la VVS évalue le sens de la verticale en utilisant une information traitée par le système visuel et que la VHS évalue le sens de la verticale en utilisant une information traitée par le système proprioceptif, même si, dans chaque cas, ces informations ne sont pas les seules. Il semble important, pour les travaux futurs, d'élaborer une méthodologie permettant de mesurer le poids des différentes modalités sensorielles : un exemple sera donné dans les perspectives à la fin de cette section. Dans la suite des paragraphes concernant l'intégration multisensorielle, le poids des informations visuelles correspond au poids des informations sensorielles issues de la modalité visuelle.

Nous avons, dans les études 2, 3 et 4, démontré que les participants sains utilisés essentiellement les informations sensorielles issues de la modalité visuelle quand ils ajustent une barre avec la verticale gravitaire dans la modalité visuo-haptique dans une condition normale. Nous

avons en effet observé une prédominance de ces informations, avec un poids relatif de 94% et avec un minimum de 84% et un maximum de 99% chez les participants sains jeunes et un poids relatif de 95% avec un minimum de 75% et un maximum de 99% chez les participants sains plus âgés. Dans une autre condition, un cadre visuel incliné était placé pour diminuer la précision des informations visuelles. Dans ces conditions, les participants indépendants au contexte visuel utilisaient de manière égale les informations issues de la modalité visuelle, avec un poids relatif de 92% (59% au minimum et 99% au maximum) alors que les participants dépendants au contexte visuel utilisaient un peu moins les informations issues de la modalité visuelle, avec un poids relatif de 72% (24% au minimum et 98% au maximum). Nos données montrent que le système nerveux central peut moduler le poids relatif des informations sensorielles en fonction de leurs précisions relatives. Ces résultats confirment ceux d'Ernst et Bank (2002) pour qui le poids des informations visuelles dans une tâche de perception de la taille d'un objet diminuait lorsqu'elles étaient rendues moins précises par l'utilisation d'un bruit visuel plus ou moins important. Néanmoins, ce résultat est assez peu naturel dans le sens où on s'attendrait à ce que les participants dépendant utilisent plus les informations visuelles. C'est l'imprécision du système visuel en présence d'un cadre, sûrement en raison du conflit sensoriel provoqué, qui donne plus d'importance aux informations haptiques. Cependant, le système haptique reste imprécis en raison des différents effets déjà mentionnés.

Les patients cérébro-lésés présentent globalement un poids des informations visuelles plus faible que pour les participants sains. En absence de trouble visuo-spatial, les patients ont un poids relatif des informations visuelles de 68% (avec un minimum de 2% et un maximum de 98%). Cette diminution du poids des informations visuelles est à mettre en relation avec la plus forte dépendance au contexte visuel des patients cérébro-lésés (Bonan *et al.*, 2006a). En présence de troubles visuo-spatiaux, les patients ont un poids relatif des informations visuelles de 57% (avec un minimum de 8% et un maximum de 96%). Il paraît évident que l'ensemble des troubles de ces patients entraîne une augmentation de l'incertitude comme le suggère l'augmentation de la variance

évaluée chez les patients. Cette augmentation n'est d'ailleurs pas observée que dans le cadre de la perception de l'espace mais est une des caractéristiques des patients d'une manière générale.

Nos données montrent donc une prévalence des informations issues de la modalité visuelle dans la modalité visuo-haptique, avec une diminution en présence d'un cadre visuel, d'une lésion cérébrale et de troubles visuo-spatiaux et une absence de différence pour les participants plus âgés. Malgré cette prévalence des informations visuelles, nos données vont dans le sens d'une intégration multisensorielle, c'est-à-dire que les participants intègrent les informations visuelles et haptiques d'une manière identique à ce qui est observé pour le maximum de vraisemblance. Cela signifie que le système nerveux central détecte les informations sensorielles les plus précises et donne plus d'importance au signal le moins variable dans le but d'améliorer les estimations multisensorielles. Cette capacité, qui semble émerger entre 8 et 10 ans (Gori *et al.*, 2008) est donc appliquée à la perception de l'espace. Par ailleurs, elle reste efficace lorsque le système nerveux vieillit (étude 4). Cependant, notre groupe de participants est âgé d'environ 53 ans et il serait donc intéressant d'évaluer des groupes plus âgés. De plus, cette capacité d'intégration multisensorielle est préservée après une lésion cérébrale et même quand les personnes présentent des troubles de la perception visuo-spatiale. Les aires cérébrales lésées chez les patients de nos études font suite à des lésions provoquées par des accidents vasculaires concernant l'artère moyenne. Les aires cérébrales touchées seraient les aires d'intégration sensorielle et nous avons décrit précédemment les projections corticales provenant des systèmes vestibulaire, visuel et somesthésique. Il est donc probable que le cortex de la jonction temporo-pariéto-occipital n'est pas le seul à être impliqué dans l'intégration des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques. En particulier, les noyaux du tronc cérébral, qui reçoivent des afférences des trois systèmes sensoriels décrits, pourrait déjà participer à l'intégration de ces informations sensorielles.

En conclusion, les informations visuelles et haptiques sont intégrées en fonction de leur précision relative afin de rendre la modalité visuo-haptique la plus précise. Cette capacité est rendue possible par les connaissances à priori que nous possédons sur la sensibilité de nos sens à percevoir les propriétés des objets. Ni l'âge, ni des lésions cérébrales, ni les troubles visuo-spatiaux qui peuvent en résulter n'altèrent cette capacité et nous n'observons qu'une modulation de la pondération des informations sensorielles.

Perspectives

Nos données en modalité visuelle suggèrent peu d'influence des conditions initiales. Cependant, une légère pente a pu être mesurée dans les études 1 et 6 et les résultats de Baccini *et al.*, (2014) suggèrent également un effet linéaire des conditions initiales, même dans la modalité visuelle. Des données anciennes indiquaient de plus un effet de la position de départ sur la VVS, avec une pente mesurée à 2,7% (Werner et Wapner, 1952). Cependant, dans cette étude, les auteurs bloquaient les positions initiales (10 essais avec la même position initiale). Nous avons envisagé une étude pour évaluer les effets cumulés de la position initiale, de la durée d'exposition et de la répétitivité de la présentation. Dans une tâche de VVS, différentes positions initiales étaient présentées (-45° , $-22,5^\circ$, $22,5^\circ$, 45°), avec une durée d'exposition de 0, 5 ou 10 secondes et une présentation bloquée ou contrebalancée. Les résultats préliminaires suggèrent qu'en absence de délai, les performances ne sont pas influencées par les positions initiales. Au contraire, quand les délais augmentent, les performances suggèrent une influence similaire à un effet cadre, avec une déviation plus importante pour les positions initiales de $\pm 22,5^\circ$ par rapport aux positions initiales à $\pm 45^\circ$, plus encore quand les positions initiales sont bloquées.

Nos données suggèrent également que l'âge n'altère pas la capacité d'intégration multisensorielle. Cependant, notre groupe de participant n'est âgé que de 53 ans. Il serait intéressant de former des groupes de 60, 70 et 80 ans en moyenne est de les comparer sur ce protocole afin d'évaluer l'impact du vieillissement sur l'intégration multisensorielle.

Un autre point qui reste à consolider est le poids des informations vestibulaires dans la perception de la verticale. En effet, il a été rappelé un grand nombre de fois dans ce travail, que la perception de la verticale nécessitait l'intégration des informations vestibulaires, visuelles et somesthésiques. Néanmoins, dans ce travail de thèse, seule l'intégration des informations visuelles et haptiques a été évaluée. En effet, dans le cadre du modèle d'Ernst et Banks (2002), deux modalités sensorielles uniquement sont utilisées. Nous avons pu démontrer que le modèle était applicable à la perception de la verticale dans la modalité visuo-haptique. L'étape suivante sera de déterminer l'importance des informations visuelles, somesthésiques et vestibulaires dans la perception de la verticale. A la manière du test d'organisation sensorielle, où les informations visuelles, somesthésiques et vestibulaires sont altérées (Bonan *et al.*, 1996), nous pensons réaliser une tâche de perception de la verticale dans la modalité visuelle en altérant les entrées sensorielles. Dans un premier temps, la VVS sera évaluée dans une condition neutre. Dans un second temps, un cadre visuel, une stimulation galvanique ou une vibration tibiale perturbera la VVS de manière isolée. Dans un troisième temps, les perturbations seront réalisées deux à deux et dans un dernier temps, les trois perturbations seront réalisées conjointement. Ce protocole devrait nous permettre d'analyser le poids des informations visuelles, somesthésiques et vestibulaires dans les différentes conditions.

Références

- Alais, D., Burr, D. (2004). The ventriloquist effect results from near optimal crossmodal integration. *Current Biology*, 14: 257-262.
- Asch, S., Witkin, H. (1948a). Studies in space orientation. II. Perception of the upright with displaced visual fields and with body tilted. *Journal of Experimental Psychology*, 38: 455-477.
- Asch, S., Witkin, H. (1948b). Studies in space orientation. I. Perception of the upright with displaced visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, 38: 325-337.
- Baccini, M., Paci, M., Del Colletto, M., Ravenni, M., Baldassi, S. (2014). The assessment of subjective visual vertical: comparison of two psychophysical paradigms and age-related performance. *Attention Perception Psychophysics*, 76: 112-122.
- Baier, B., Suchan, J., Karnath, H., Dieterich, M. (2012). Neural correlates of disturbed perception of verticality. *Neurology*, 78: 728-735.
- Barbieri, G., Gissot, A., Pérennou, D. (2010). Ageing of the postural vertical. *Age*, 32: 51-60.
- Barneveld, D., Grootel, T., Alberts, B., Opstal, A. (2011). The effect of head roll on perceived auditory zenith. *Experimental Brain Research*, 213(2-3): 235-243.
- Bauermeister, M., Werner, H., Wapner, S. (1964). The Effect of body tilt on tactual-kinesthetic perception of verticality. *The American Journal of Psychology*, 77: 451-456.
- Beh, H., Wenderoth, P., Purcell, A. (1971). The angular function of a *rod-and-frame* illusion. *Perception & Psychophysics*, 9: 353-355.
- Beh, H., Wenderoth, P. (1972). The effect of variation of frame shape on the angular function of the *rod-and-frame* illusion. *Perception and Psychophysics*, 11: 35-37.
- Bisdorff, A. P., Wolsley, C., Anastasopoulos, D., Bronstein, A., Gresty, M. (1996). The Perception of body verticality (subjective postural vertical) in peripheral and central vestibular disorders. *Brain*, 119: 1523-1534.
- Bisiach, E. (1994). Perception and action in space representation: Evidence from unilateral neglect. *International Perspectives on Psychological Science*, 2 : 51-66.
- Bonan, I., Derighetti, F., Gellez-Leman, M., Bradai, N., Yelnik, A. (2006a). Dépendance visuelle après accident vasculaire cérébral récent. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 49: 166-171.
- Bonan, I., Guettard, E., Leman, M., Colle, F., Yelnik, A. (2006b). Subjective visual vertical perception relates to balance in acute stroke. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 87: 642-646.
- Bonan, I., Yelnik, A., Laffont, I., Vitte, E., Freyss, G. (1996). Sélection des afférences sensorielles dans l'équilibration de l'hémiplégique après accident vasculaire cérébral. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 39: 157-163.
- Bohmer, A., Mast, F. (1999). Assessing otolith function by the subjective visual vertical. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 871: 221-231.
- Bowen, A., McKenna, K., Tallis, R. C. (1999). Reasons for variability in the reported rate of occurrence of unilateral spatial neglect after stroke. *Stroke*, 30: 1196-1202.
- Brandt, T., Dieterich, M., Danek, A. (1994). Vestibular Cortex Lesions Affect the Perception of Verticality. *Annals of Neurology*, 35: 403-412.
- Braem, B., Honoré, J., Saj, A., Rousseaux, M., Coello, Y. (2009). Intégration multimodale dans la perception de la verticale. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, 39: 246.
- Braem B., Rousseaux M., Coello Y., Honoré J. (2012). Verticale subjective haptique : influence des conditions d'évaluation. In A. Hamaoui, M. Lacour (Eds) : *Du Contrôle postural à l'exécution du mouvement* (pp 95-103). Paris : De Boeck - Solal. Collection Posture & Equilibre.
- Braem, B., Saj, A., Coello, Y., Rousseaux, M., Honoré, J. (2011). Verticales subjectives chez les patients cérébro-lésés droits. In Defebvre, L., Lacour, M. (Eds), *Posture et locomotion* (pp 267-276). Marseille : Solal. Collection Posture & Equilibre.

- Bronstein, A. (1999). The interaction of otolith and proprioceptive information in the perception of verticality: the effects of labyrinthine and CNS disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 871: 324-333.
- Bronstein, A., Perennou, D., Guerraz, M., Playford, D., Rudge, P. (2003). Dissociation of visual and haptic vertical in two patients with vestibular nuclear lesions. *Neurology*, 61: 1260-1262.
- Bullier, J. (1998). Architecture fonctionnelle du système visuel. In M. Boucart, M. Hénaff, C. Belin, *Vision: aspect perceptifs et cognitifs*, 11-41. Marseille : Solal
- Cian, C., Raphel, C., Barraud, P. (2001). The role of cognitive factors in the *rod-and-frame* effect. *Perception*, 30: 1427-1438.
- Chokron, S., Colliot, P., Atzeni, T., Bartolomeo, P., Ohlmann, T. (2004). Active versus passive proprioceptive straight-ahead pointing in normal subjects. *Brain and Cognition*, 55: 290-294.
- Clark, B., Graybiel, A. (1963). Perception of the postural vertical in normals and subjects with labyrinthine defects. *Journal of Experimental Psychology*, 65: 490.
- Crémieux, J., Mesure S. (1994). Differential sensitivity to static visual cues in the control of postural equilibrium in man. *Perceptual and Motor Skills*, 78: 67- 74.
- Day, B., Cole, J. (2002). Vestibular-evoked postural responses in the absence of somatosensory information. *Brain*, 125: 2081-2088.
- de Waele, C., Baudonnière, P., Lepecq, J., Tran Ba Huy, P., Vidal, P. (2001). Vestibular projections in the human cortex. *Experimental Brain Research*, 141: 541-551
- Diener, H., Dichgans, J. (1988). On the role of vestibular, visual and somatosensory information for dynamic postural control in humans. *Prog Brain Res*, 76 : 253-262.
- Dietz, V., Gollhofer, A., Kleiber, M., Trippel, M. (1992). Regulation of bipedal stance: dependence on “load” receptors. *Experimental Brain Research*, 89: 229-231.
- Ernst, M., Banks, M. (2002). Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature*, 415: 429-433.
- Ernst, M. (2006). A Bayesian view on multimodal cue integration. In Knoblich, G., Thornton, I., Grosjean, M., Shiffrar, M. (Eds), *Human Body Perception From The Inside Out* (pp. 105-131). New York : Oxford University Press.
- Felleman, D. Van Essen, D. (1991). Distributed hierarchical processing in the primate cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 1: 1-47.
- Ferber, S., Karnath, H. (1999). Parietal and occipital lobe contributions to perception of straight ahead orientation. *JNNP*, 67: 572-578.
- Ferber, S., Karnath, H. (2001). Size perception in hemianopia and neglect. *Brain*, 124 : 527-536.
- Funk, J., Finke, K., Müller, H., Preger, R., Kerkhoff, G. (2010a). Systematic biases in the tactile perception of the subjective vertical in patients with unilateral neglect and the influence of upright vs. supine posture. *Neuropsychologia*, 48: 298-308.
- Funk, J., Finke, K., Müller, H.J., Utz, K., Kerkhoff, G. (2010b). Effects of lateral head inclination on multimodal spatial orientation judgments in neglect: evidence for impaired spatial orientation constancy. *Neuropsychologia* 48: 1616-1627.
- Gauthier, L., Dehaut, F., Joanette, Y. (1989). The Bells Test: A quantitative and qualitative test for visual neglect. *International Journal of Clinical Neuropsychology*, 11: 49-54.
- Gentaz, E., Luyat, M., Cian, C., Hatwell, Y., Barraud, P., Raphel, C. (2001). The reproduction of vertical and oblique orientations in the visual, haptic, and somatovestibular systems. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54: 513-526.
- Gentaz, E., Hatwell, Y. (1998). The haptic oblique effect in the perception of rod orientation by blind adults. *Perception & Psychophysics*, 60, 157-167.
- Gibson, J. J. (1952). The relation between visual and postural determinants of the phenomenal vertical. *Psychological Review*, 59: 370-375.
- Gibson, J. (1962). Observations on active touch. *Psychological Review*, 69: 477-491.

- Goodale, M., Milner, A. (1992). Separate visual pathways for perception and action. *Trends in Neurosciences*, 15(1), 20-25.
- Gori, M., Viva, M., Sandini, G., Burr, D. (2008). Young Children Do Not Integrate Visual and Haptic Form Information. *Current Biology*, 18: 694-698.
- Green, D. Swets, J. (1988). Signal detection theory and psychophysics. Peninsula Publishing, Las Altos, Californication, USA.
- Guerraz, M., Luyat, M., Poquin, D., Ohlmann, T. (2000). The role of neck afferents in subjective orientation in the visual and tactile sensory modalities. *Acta Oto-laryngologica*, 120: 735-738.
- Guerraz, M., Poquin, D., Ohlmann, T. (1998). The role of head-centric spatial reference with a static and kinetic visual disturbance. *Perception & Psychophysics*, 60: 287-295.
- Guldin, W., Grüsser, O. (1998). Is there a vestibular cortex? *Trends Neurosci*, 21: 254-259
- Harris, C., Wolpert, D. (1998). Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature*, 394: 780-784.
- Heilman, K. (1979). Neglect and related disorders. In K. M. Heilman, E. Valenstein (Eds), *Clinical Neuropsychology*. New York: Oxford University Press.
- Heller, M. (1983). Haptic dominance in form perception with blurred vision. *Perception*, 12: 607-613.
- Hoppenbrouwers, M., Wuyts, F., Van de Heyning, P. (2004). Suppression of the E-effect during the subjective visual vertical test. *Neuroreport*, 15: 325-327.
- Karnath, H., Ferber, S., Dichgans, J. (2000). The neural representation of postural control in humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 13931-13936.
- Kerkhoff, G. (1999). Multimodal spatial orientation deficits in left-sided visual neglect. *Neuropsychologia*, 37: 1387-1405.
- Kerkhoff, G. (2001). Spatial hemineglect in humans. *Progress in Neurobiology*, 63: 1-27.
- Kerkhoff, G., Bucher L. (2008). Line bisection as an early method to assess homonymous hemianopia. *Cortex*, 44: 200-205.
- Knill, D., Pouget, A. (2004). The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *Trends in Neurosciences*, 27: 712-719.
- Körding, K., Wolpert, D. (2004). Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature*, 427: 244-247.
- Lederman, S., Klatzky, R.L. (1993). Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychologica*, 84: 29-40.
- Li, B., Peterson, M., Freeman, R. (2003). Oblique Effect: A Neural Basis in the Visual Cortex. *Journal of Neurophysiology*, 90: 204-217.
- Loomis, J. M., & Lederman, S. J. (1986). Tactual perception. In Boff. K., Kaufman. L., Thomas. J (Eds), *Handbook of perception and human performances*, (pp 1-41). New York : Wiley.
- Lopez, C., Lacour, M., Borel, L. (2005). Perception de la verticalité et représentations spatiales dans les aires corticales vestibulaires. In Lacour, M., Weber, B. (Eds), *Bipédie, contrôle postural et représentation corticale*. (pp 35-86). Marseille : Solal.
- Lord, S., Webster, I. (1990). Visual field dependence in elderly fallers and non-fallers. *The International Journal of Aging and Human Development*, 31: 267-277.
- Luyat, M., Gentaz, E., Corte, T., Guerraz, M. (2001). Reference frames and haptic perception of orientation: Body and head tilt effects on the oblique effect. *Perception & Psychophysics*, 63: 541-554.
- Luyat, M., Moroni, C., Gentaz, E. (2005). The role of contextual cues in the haptic perception of orientations and the oblique effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, 12: 760-766.
- Luyat, M., Ohlmann, T., Barraud, P. (1997). Subjective vertical and postural activity. *Acta Psychologica*, 95: 181-193.
- Machner, B., Sprenger, A., Hansen, U., Heide, W., Helmchen, C. (2009). Acute hemianopic patients

- do not show a contralesional deviation in the line bisection task. *Journal of Neurology*, 256: 289-290.
- Mann, C. (1952). Visual factors in the perception of verticality. *Journal of Experimental Psychology*, 44: 460-464.
- Mazibrada, G., Tariq, S., Pérennou, D., Gresty, M., Greenwood, R., Bronstein, A. (2008). The peripheral nervous system and the perception of verticality. *Gait & Posture*, 27: 202-208.
- Mergner, T., Rosemeier, T. (1998). Interaction of vestibular, somatosensory and visual signals for postural control and motion perception under terrestrial and microgravity conditions--a conceptual model. *Brain Research Reviews*, 28: 118-135.
- Mertz, S., Lepecq, J. (2001). Imagined body orientation and perception of the visual vertical. *Psychological Research*, 65: 64-70.
- Milner, A. Goodale, M. (1995). *The visual brain in action*. Oxford, England: Oxford University Press.
- Ogden, J.A. (1985). Anterior-posterior interhemispheric differences in the loci of lesions producing visual hemineglect. *Brain and Cognition*, 4: 59-75.
- Oldfield, R. (1971). The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia*, 9: 97-113.
- Oltman, P. (1968). A portable rod-and-frame apparatus. *Perceptual and Motor Skills*, 26: 503-506.
- Penfield, W., Rasmussen, T. (1950). *The cerebral cortex of man; a clinical study of localization of function*, New York: Macmillan.
- Pérennou, D. (2005). Vers une meilleure compréhension et une évaluation quantifiée du « pushing », un comportement postural dû à certains AVC. *Annales de Réadaptation et de Médecine Physique*, 48 : 198-206.
- Pérennou, D., Mazibrada, G., Chauvineau, V., Greenwood, R., Rothwell, J., Gresty, M., Bronstein, A. (2008). Lateropulsion, pushing and verticality perception in hemisphere stroke: a causal relationship? *Brain*, 131: 2401-2413.
- Pizzamiglio, L., Vallar, G., Doricchi, F. (1997). Gravitational inputs modulate visuospatial neglect. *Experimental Brain Research*, 117: 341-345.
- Pohl, W. (1973). Dissociation of spatial discrimination following frontal and parietal lesions in monkeys. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 82: 227-239.
- Renzi, E., Faglioni, P., Scotti, G. (1971). Judgment of spatial orientation in patients with focal brain damage. *Journal of neurology neurosurgery and psychiatry*, 34: 489-495.
- Richard, C., Rousseaux, M., Saj, A., Honoré, J. (2004). Straight ahead in spatial neglect: Evidence that space is shifted, not rotated. *Neurology*, 63: 2136-2138.
- Rock, I., Victor, J. (1964). Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, 143: 594-596.
- Roll, R., Kavounoudias, A., Roll, J.P. (2002). Cutaneous afferents from human plantar sole contribute to body posture awareness. *NeuroReport*, 13: 1957-1961.
- Rondot, P., Odier, F., Valade, D. (1992). Postural disturbances due to homonymous hemianopic visual ataxia. *Brain*, 115: 179-188.
- Rousseaux, M., Beis, J., Pradat-Diehl, P., Martin, Y., Bartolomeo, P., Bernati, T., Chokron, S., Leclercq, M., Louis-Dreyfus, A., Marchal, F., Perennou, D., Prairial, C., Rode, G., Samuel, C., Sieroff, E., Wiart, L., Azouvi, P. (2001). Batterie de dépistage de la négligence spatiale. Normes et effets de l'âge, du niveau d'éducation, du sexe, de la main et de la latéralité. *Revue Neurologique (Paris)*, 157 : 1385-1400.
- Rousseaux, M., Honoré, J., Vuilleumier, P., Saj, A. (2013). Neuroanatomy of space, body, and posture perception in patients with right hemisphere stroke. *Neurology*, 81: 1291-1297.
- Saj, A., Honoré, J., Bernati, T., Coello, Y., Rousseaux, M. (2005a). Subjective Visual Vertical in Pitch and Roll in Right Hemispheric Stroke. *Stroke*, 36: 588-591.
- Saj, A., Honoré, J., Coello, Y., Rousseaux, M. (2005b). The visual vertical in the pusher syndrome:

- influence of hemispace and body position. *Journal of neurology*, 252: 885–891.
- Saj, A., Honoré, J., Davroux, J., Coello, Y., Rousseaux, M. (2005c). Effect of Posture on the Perception of Verticality in Neglect Patients. *Stroke*, 36: 2203-2205.
- Saj, A., Honoré, J., Richard, C., Coello, Y., Bernati, T., Rousseaux, M. (2006a). Where is the « straight ahead » in spatial neglect? *Neurology*, 67: 1500-1503.
- Saj, A., Honoré, J., Rousseaux, M. (2006b). Perception of the vertical in patients with right hemispheric lesion: Effect of galvanic vestibular stimulation. *Neuropsychologia*, 44: 1509-1512.
- Saj, A., Vuilleumier, P. (2007). Neglect: Remembering the Space Left Behind. *Current Biology*, 17: 1060-1062.
- Saj, A., Honoré, J., Bernati, T., Richard, C., Rousseaux, M. (2008). Reducing rightward bias of subjective straight ahead in neglect patients by changes in body orientation. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, 79: 991-996.
- Saj, A., Honoré, J., Richard, C., Bernati, T., Rousseaux, M. (2010). Hemianopia and neglect influence on straight-ahead perception. *European Neurology*, 64: 297-303.
- Saj, A., Honoré, J., Bernati, T., Rousseaux, M. (2012a). Influence of Spatial Neglect, Hemianopia and Hemispace on the Subjective Vertical. *European Neurology*, 68: 240–246.
- Saj, A., Honoré, J., Braem, B., Bernati, T., Rousseaux, M. (2012b). Time since stroke influences the impact of hemianopia and spatial neglect on visual-spatial tasks. *Neuropsychology*, 26: 37-44.
- Sampaio, E., Chokron, S. (1992). Pseudoneglect and reversed pseudoneglect among left-handers and right-handers. *Neuropsychologia*, 30: 797–805.
- Schenkenberg, T., Bradford, D., Ajax, E. (1980). Line bisection and unilateral visual neglect in patients with neurologic impairment. *Neurology*, 30: 509-517.
- Taguchi, K., Sasaki, O., Sato, K., Nezu, K., Sakaguchi M. (1995). Subjective vertical and vestibular lesion. *Acta Oto-laryngologica*, 519: 201-203.
- Tardy-Gervet, M., Severac-Cauquil, A. (1998). Effects of galvanic vestibular stimulation on perception of subjective vertical in standing humans. *Perceptual and Motor Skills*, 86: 1155-1161.
- Trousselard, M., Barraud, P., Nougier, V., Raphel, C., Cian, C. (2004). Contribution of tactile and interoceptive cues to the perception of the direction of gravity. *Cognitive Brain Research*, 20: 355–362.
- Trousselard, M., Cian, C., Nougier, V., Pla, S., Raphel, C. (2003). Contribution of somesthetic cues to the perception of body orientation and subjective visual vertical. *Perception & Psychophysics*, 65: 1179–1187.
- Van Beers, R., Sittig, C., van der Gon, J. (1999). Integration of proprioceptive and visual position-information: An experimentally supported model. *Journal of Neurophysiology*, 81: 1355–1364.
- Vallar, G. (1993). The anatomical basis of spatial hemineglect in humans. In: Robertson, I., Marshall, J. (Eds.), *Unilateral Neglect: Clinical and Experimental Studies*. (pp 27-53) Lawrence Erlbaum Associates, Hove.
- Viader, F., de la Sayette, V. (1992). *Les Syndromes de Négligence Unilatérale. Rapport de Neurologie: Congrès de Psychiatrie et de Neurologie de Langue Française*. Paris: Masson.
- Viaud-Delmon I, Brugger P, Landis T. (2007). Hemineglect: take a look at the back space. *Annals of Neurology*, 62: 418-422.
- Vighetto, A. (1998). Les troubles visuo-spatiaux : aspect perceptifs et cognitifs. In M. Boucart, M. Hénaïff, C. Belin, *Vision : aspect perceptif et cognitif*, 89-100. Marseille : Solal.
- Welch, R., Warren, D. (1986). Intersensory interactions. In Kaufman, K., Thomas. J. (Eds). *Handbook of perception and human performances*, (pp 1-36). New York : Wiley.
- Werner, H., Wapner, S. (1952). Experiments on sensory-tonic field theory of perception: IV. Effect

- of initial position of a rod on apparent verticality. *Journal of Experimental Psychology*, 43: 68–74.
- Witkin, H., Asch, S. (1948a). Studies in space orientation. IV. Further experiments on perception of the upright with displaced visual fields. *Journal of Experimental Psychology*, 38: 762-782.
- Witkin, H., Asch, S. (1948b). Studies in space orientation. III. Perception of the upright in the absence of a visual field. *Journal of Experimental Psychology*, 38: 603-614.
- Yardley, L. (1990). Contribution of somatosensory information to perception of the visual vertical with body tilt and rotating visual field. *Perception & Psychophysics*, 48: 131–134.
- Yelnik, A., Lebreton, F., Bonan, I., Colle, F., Meurin, F., Guichard, J., Vicaud, E. (2002). Perception of verticality after recent cerebral hemispheric stroke. *Stroke*, 33: 2247–2253.
- Zink, R., Bucher, S., Weiss, A., Brandt, T., Dieterich, M. (1998). Effects of galvanic vestibular stimulation on otolithic and semicircular canal eye movements and perceived vertical. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 107: 200-205.

Annexes

Annexe 1 : Braem, B., Honoré, J., Rousseaux, M., Saj, A., Coello, Y.
(2014). Integration of visual and haptic information in the perception of
the vertical in young and old healthy adults and right brain-damaged
patient. *Neurophysiologie Clinique / Clinical Neurophysiology*, 44, 41-48.



Disponible en ligne sur

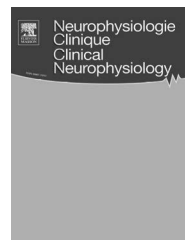
ScienceDirect

www.sciencedirect.com

Elsevier Masson France

EM|consulte

www.em-consulte.com/en



ORIGINAL ARTICLE/ARTICLE ORIGINAL

Integration of visual and haptic informations in the perception of the vertical in young and old healthy adults and right brain-damaged patients



Perception de la verticale chez des adultes sains jeunes et âgés et des patients avec lésion cérébrale droite : intégration des informations visuelles et haptiques

B. Braem^{a,b}, J. Honoré^{c,d,*}, M. Rousseaux^{b,e}, A. Saj^{f,g},
Y. Coello^a

^a EA 1059 (URECA), Université Nord-de-France, 59653 Villeneuve-d'Ascq, France

^b Service de rééducation neurologique, hôpital Swynghedauw, CHRU de Lille, 59037 Lille, France

^c EA 4559 (LNFP), Université Nord-de-France, 59037 Lille, France

^d CNRS, 59000 Lille, France

^e EA 2691, Université Nord-de-France, 59037 Lille, France

^f Neurology and Cognitive Neuroimaging, Department of Neuroscience, University of Geneva, 1211 Geneva, Switzerland

^g Department of Neurology, University Hospital of Geneva, 1211 Geneva, Switzerland

Received 15 October 2013; accepted 16 October 2013

Available online 6 November 2013

KEYWORDS

Subjective vertical;
Visuo-haptic
integration;
Right brain lesion;
Spatial neglect;
Aging

Summary

Objective. — Multimodal perception raises the issue of sensory integration. The aim of this study is to assess whether the visuo-haptic subjective vertical could be predicted from the visual and haptic unimodal performances, according to a Bayesian model, which optimizes the reliability of the multimodal estimate. The limits of the model were assessed by evaluating the impact of aging, cerebral damage and spatial deficits.

* Corresponding author. EA 4559 (LNFP), E.F. Vision, hôpital Salengro, CHU de Lille, 59037 Lille, France.

E-mail addresses: berenger.braem@gmail.com (B. Braem), Jacques.Honore@chru-lille.fr (J. Honoré), Marc.Rousseaux@chru-lille.fr (M. Rousseaux), Arnaud.Saj@unige.ch (A. Saj), yann.coello@univ-lille3.fr (Y. Coello).

MOTS CLÉS

Verticale subjective ;
Intégration
visuo-haptique ;
Lésion cérébrale
droite ;
Négligence spatiale ;
Âge

Method. — Young and older healthy participants, as well as patients with a right hemisphere lesion, suffering from spatial neglect or not, had to align a rod with the gravitational vertical in the visual, haptic and visuo-haptic modalities.

Results. — Visuo-haptic subjective vertical was correctly predicted by the model in healthy participants, as well as in patients in spite of different performances. An anticlockwise deviation of the subjective vertical was observed in the neglect group whatever the experimental conditions. By contrast, no deviation was observed in both non-neglect and healthy groups, for the visual and the visuo-haptic modalities. Nevertheless, the haptic subjective vertical was deviated, anticlockwise in the non-neglect patients and older healthy adults, and clockwise in the young healthy adults. Moreover, the variance was the smallest in the bimodal condition.

Conclusion. — The integration of visual and haptic signals appeared to obey a Bayesian model optimizing the reliability of the multimodal estimate. This holds true despite of aging, brain damage or visuospatial disorders. Regarding the perception of the vertical, multisensory integration does not seem thus to depend only on right posterior cortical areas.

© 2013 Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Résumé

Objectif. — La perception multimodalitaire pose la question de l'intégration sensorielle. Le but de l'étude était de vérifier si la verticale subjective visuo-haptique pouvait être prédite à partir des performances unimodales, selon un modèle bayésien optimisant la variabilité de l'estimation multimodalitaire. Les limites du modèle ont été testées en évaluant l'influence de l'âge, de lésions cérébrales ou de troubles visuospatiaux.

Participants. — Des participants jeunes et plus âgés, ainsi que des patients porteurs d'une lésion hémisphérique droite, souffrant d'une négligence spatiale ou non, devaient aligner une barre avec la verticale gravitaire dans les modalités visuelles, haptiques et visuo-haptiques.

Résultats. — Les performances en modalité visuo-haptique étaient proches des prédictions du modèle, chez les participants sains comme chez les patients, malgré les différences de verticales subjectives. Chez les patients négligents, la verticale subjective était déviée dans les trois modalités. Chez les patients non négligents et les participants sains, elle n'était déviée que dans la modalité haptique, dans le sens anti-horaire chez les patients non négligents et les adultes sains plus âgés, et dans le sens horaire chez les jeunes adultes sains. Par ailleurs, la variabilité la plus faible était observée dans la modalité visuo-haptique.

Conclusion. — L'intégration des informations visuelles et haptiques paraît obéir à un modèle bayésien optimisant la variabilité de l'estimation multimodalitaire, même chez des personnes vieillissantes, souffrant d'atteintes cérébrales ou de troubles visuospatiaux. Concernant la perception de la verticale, l'intégration multisensorielle ne semble donc pas dépendre de l'intégrité des aires corticales postérieures droites.

© 2013 Elsevier Masson SAS. Tous droits réservés.

Introduction

Perceiving the spatial properties of our environment is essential for regulating our interactions with the objects that compose it. Some of these properties are perceived by one sensory system only while other properties can be perceived by different sensory systems (see [24]). For example, the size of an object can be estimated from visual signals only, or from haptic signals, i.e. "inputs from receptors embedded in the skin, as well as in muscles, tendons and joints" [17]. It can eventually be estimated by combining these two sensory signals. In the case of multisensory perception, the use of different signals raises the question of the combination principle used by the nervous system to take into account the non-equivalent nature and variability of the information provided by each sensory system. In the early sixties, Rock and Victor [24] were already aware of this issue and tested how the size of objects was perceived when visual and haptic information conflicted. In this study,

participants watched the object through a mirror so that it appeared, for instance, visually as a rectangle but haptically as a square. The results showed that they systematically based their estimation of the size on the information conveyed by the visual system, as if they were ignoring the haptic information, a phenomenon called "visual capture" [24]. In another study, "haptic capture" was found in conditions where visual information was degraded [11]. Later, Welch and Warren [32] suggested that, in case of perceptual conflict, the less uncertain sensory modality is generally used to estimate objects' physical properties.

Ernst and Banks [3,4] proposed a more general model of multimodal perception where all the available sensory signals are used, each being weighted according to its reliability, in the final perceptual estimate. It is to note that, in this view, the capture phenomenon occurs when one modality has a much higher reliability than the others. In the study of Ernst and Banks [4], the size of an object was estimated on the basis of visual (V), haptic (H), or visuo-haptic

information (VH). The visual device enabled the perception of a cuboid object from a stereoscopic random-dots display and different levels of noise were introduced to deteriorate the visual information. On the contrary, the device stimulating the fingers let the haptic information unchanged. As expected, the multimodal estimates of object size depended on a combination where each unimodal estimation was weighted by the inverse of its relative variance (i.e. its reliability). In the statistical model of Ernst and Banks [3,4], the perceptual system behaves like an optimal Bayesian integrator providing maximum-likelihood estimates (MLE) of the perceived physical properties. Indeed, this model proved to be fruitful and predicted multimodal perception in a large number of situations, as learning a new motor skill [16] or pointing toward a target when using optical prism [31]. It offers a possible description of neural coding strategies that the brain could use in order to decrease uncertainty in multimodal estimations [15]. An important prediction of the model is that the reliability of the multimodal estimate is higher (i.e. with a lower variability) than that of each unimodal estimate, which represents a strong adaptive advantage [9]. Taken as a whole, the available data in favour of the model suggest that the brain is able to detect the less uncertain (the less variable) system and can adjust its weight in the final product of the integration process. One may wonder if the model still works when one system is affected by a bias.

More recently, Gori et al. [8] questioned the emergence of optimal combination of visual and haptic information during childhood. They placed a streaked screen at different distances of a visual object to alter the visual perception of its orientation. With adults, the results were similar to those obtained by Ernst and Banks [4]: the weight of visual information was higher than that of haptic information, but it decreased when the level of visual noise increased. The performances in the visuo-haptic modality conformed to the Bayesian model based on MLE and the visuo-haptic variance was found to be lower than the visual and haptic unimodal variances. When testing children, the results showed that before the age of eight, children preferentially used visual information in the orientation perceptual task. Strategies gradually evolved and allowed, at the age of ten, a multisensory integration based on MLE. Data suggest that before the age of ten, children cannot detect the less uncertain system, may be because they do not have enough experience (prior knowledge) in the multiple perceptions of the properties. Another point is that optimal integration of multisensory information appears then to be dependent on the maturation of the brain, with a determinant improvement arising around 8–10 years. By contrast, little is known about the eventual loss of this ability in the elderly. Likewise, we don't know how brain lesions affect the integration of multisensory information, in particular, in patients with damage to associative areas resulting or not in spatial orientation impairments.

With regard to the perception of orientations, one classical paradigm consists in asking individuals to perceptually estimate the vertical, i.e. the idiosyncratic account of the direction of the gravity. The methods to assess this subjective vertical (SV) are relatively standard. In the visual modality, a lighted bar is presented in a darkened room and the participants' task is to rotate the bar to put it vertically

using a joystick [19] or verbal instructions [1]. In the haptic modality, the bar is not lighted and the participants have to put the bar vertically using the haptic information from the hand and the arm [14]. In the visuo-haptic condition, participants benefit from both visual and haptic information [26,28]. Past studies have highlighted that brain injury patients often show a deviation of the SV. Brandt et al. [2], for instance, reported that unilateral posterior cortical lesions lead to a contralateral deviation of the SV. Moreover, right parietal lesion resulting from a cerebral stroke often lead to an anticlockwise deviation of the SV [33] and spatial neglect ("Failure to report, respond, or orient to novel or meaningful stimuli presented in a specific location when this failure cannot be attributed to either sensory or motor defects" [10]) can amplify the deviation of the SV [14,26,28]. Moreover, left hemianopia (amputation of the left visual field after cerebral stroke) can alter the SV in the anticlockwise direction [27]. In right brain-damaged patients, a deviation of the SV may result from multisensory deficit because the cerebral lesions may involve cerebral structures playing a determinant role in multimodal space integration [30], which, however, has never been properly tested.

The present study was thus designed to evaluate the integration of multisensory information in the perception of the orientation in healthy participants. We compared the perception of SV when based on visual (VSV), haptic (HSV) or visuo-haptic information (VHSV), using the same apparatus and similar methods in the three conditions. In accordance with the MLE model, the performance of young healthy adults in the bimodal condition should be predictable from the performances obtained in the HSV and VSV conditions, weighted by their respective reliabilities. Moreover, the reliability of the VHSV should be higher than that of the unimodal perceptual estimates. In accordance with the literature, the visual weight should be greater than the haptic weight. In order to assess the limits of the model, older healthy adults, as well as brain-damaged patients, with and without acknowledged deficits in spatial cognition, have been included in the study. An ancillary objective was to retrieve the classical SV biases of neurological patients [14,26,28].

Method

Participants

Twenty-one young healthy adults (YHA, mean age: 23.9 ± 2.3 years, nine males and twelve females), eight older healthy adults (OHA, mean age: 53.5 ± 6.9 years, three males and five females) and sixteen right brain-damaged patients participated in this study after signing an informed consent form. They all were right-handed (score $> 18/20$ to the Edinburgh laterality test [22]). Healthy adults had no psychiatric disorder, no history of brain lesion; they had a normal or corrected-to-normal vision. Patients were recruited in the Neurological Rehabilitation Unit of the Hospital Swynghedauw (CHU de Lille); all had a single right brain lesion following a relatively recent (5–20 weeks) vascular stroke documented by MRI or CT. Patients with pusher syndrome [13], bilateral lesions, previous neurological or psychiatric signs of vestibular damage (vertigo, nystagmus),

severe behavioural disorders or motor impairment of the right arm were excluded from the study. The presence of signs of left spatial neglect was assessed by a battery of neuropsychological tests: cancellation [7], line bisection [29] and scene copy [21]. The patients were diagnosed as neglect patients (N+) when they failed to at least two out of the three tests. They also had a visual field examination (Goldmann perimetry) to detect signs of hemianopia. Ten patients (63.8 ± 11.4 years) were included in the neglect (N+) group, six of them showing an hemianopia. The six other patients (57.3 ± 15.8 years) who had no neglect signs were included in the non-neglect (N-) group; none suffered from hemianopia. Demographic and clinical data of patients are given in Table 1.

Apparatus

The experience took place in a dark and quiet room. Each participant was tested individually. The apparatus (see also [28]) consisted in a hospital bed where the participant was in sitting position with legs extended. A blackboard was placed in front of the participant. On the blackboard was fastened a smooth metal disk (25 cm in diameter) with a metal rod (25 cm long, 1 cm wide and 1 cm deep) that could rotate ahead of the disk in a frontal plane. The bar contained 10 red LEDs and was connected to a potentiometer giving its inclination with an accuracy of 0.1° . A negative value indicated an anticlockwise deviation of the bar, a positive value a clockwise deviation.

Procedure

Participants were placed on the hospital bed at a distance of 40 cm of the disc, which was centered relative to their body. The head was held by a strap. The task was to align

the bar (initially inclined at -45° or 45° at the beginning of each trial) with the gravity using visual (V), haptic (H) or visuo-haptic (VH) information. In the VSV condition, the participants looked at the bar but were not allowed to reach it: they indicated verbally (top of the bar toward the right or left) to the experimenter how to align the bar vertically with the gravity. In the HSV condition, the participants were blindfolded. Their right hand was placed by the experimenter at the centre of the bar and they were requested to adjust the bar vertically, using only haptic information. Participants could not explore the bar manually as they could only manipulate the centre of the bar. In the combined modality (VHSV), the participants looked at the bar and were requested to align it with the vertical using their right hand. The importance of providing precise estimations of the SV was emphasised. The completion time was not taken into account, but the adjustments never exceeded a few seconds. Each participant was tested in the three conditions (VSV, HSV and VHSV), and the order of presentation was counterbalanced across the participants. Each participant performed two adjustments for each initial position of the bar for a total of 12 adjustments (3 conditions * 2 initial positions * 2 trials). The orientation of the bar was registered after each trial and the deviation from the true vertical direction was computed in degrees.

Optimal integration of multisensory information

Different sensory information was available to align the bar vertically with the gravity in the unimodal (VSV and HSV) and bimodal (VHSV) conditions. This allowed us to evaluate the accuracy and variability of the visual and haptic systems and to predict the theoretical contribution of each sensory system in the visuo-haptic condition. A mean (\bar{X}) and a variance (Δ) were calculated in each condition (\bar{X}_v and Δ_v in the

Table 1 Patients: demographic and clinical data.

Group	Age	Sex	Years of schooling	Time since stroke (in weeks)	Bell cancellation			Scene copy (/4)	Line bisection (%)	Hemianopia
					Left (/15)	Center (/5)	Right (/15)			
N+	60	M	13	8	10	2	1	4	43	—
N+	70	M	11	10	7	1	0	4	46	—
N+	54	F	10	9	5	0	2	0	30	—
N+	73	F	8	7	7	0	2	0	15	—
N+	55	M	15	5	15	2	0	1	67	+
N+	54	M	15	8	15	5	10	4	70	+
N+	46	F	10	5	5	0	2	3	16	+
N+	70	F	8	10	7	0	2	0	18	+
N+	76	F	11	5	15	5	5	4	74	+
N+	80	F	8	7	8	1	3	2	20	+
N—	70	F	8	9	0	0	1	0	9	—
N—	62	M	20	16	2	0	2	0	—1	—
N—	69	M	8	20	1	0	0	0	3	—
N—	56	M	11	8	2	0	1	0	—2	—
N—	60	M	14	6	0	0	0	0	—1	—
N—	27	M	13	13	2	0	0	0	1	—

visual condition, X_h and Δh in the haptic condition, and X_{vh} and Δ_{vh} in the visuo-haptic condition). For the visual and haptic sensory systems respectively, the theoretical weights were estimated as follows:

$$W_v = \Delta h / (\Delta h + \Delta v) \quad (1)$$

$$W_h = \Delta v / (\Delta h + \Delta v) \text{ or } W_h = 1 - W_v \quad (2)$$

According to the Bayesian MLE model, the expected value (E_{vh}) of the perceptual performance in the visuo-haptic was:

$$E_{vh} = X_v \times W_v + X_h \times W_h \quad (3)$$

E_{vh} was compared to the actual perceptual performance (X_{vh}). We also verified that the variance of the visuo-haptic estimations (Δ_{vh}) was smaller than both the variances of the visual (Δv) and of the haptic (Δh) systems consider individually.

Statistical analyses

Firstly, for each group, individual visual and haptic relative weights were calculated [eq. (1) and (2)] from the raw data, in order to predict the visuo-haptic VSs, according to the Bayesian MLE model [eq. (3)]. The predicted individual visuo-haptic SVs were compared to the observed SVs and visuo-haptic variances were compared to visual and haptic variances. Secondly, (ancillary objective), for each group, the SVs were compared to the baseline (0° deviation) using the standard Student *t*-test in order to detect possible biases. Modality and group effects were tested using analyses of variance (ANOVAs) and Newman-Keuls post-hoc tests. The significance level was set to $P=0.05$ (two-tailed).

Results

Visual and haptic weights

The weights gave an estimate of the relative precision of the sensory systems. The less uncertain (i.e. more reliable or less variable) a modality, the higher its weight. The visual weight (Fig. 1) differed according to the group [$F(3, 41)=7.23$, $P<0.01$]. Pairwise comparisons showed that

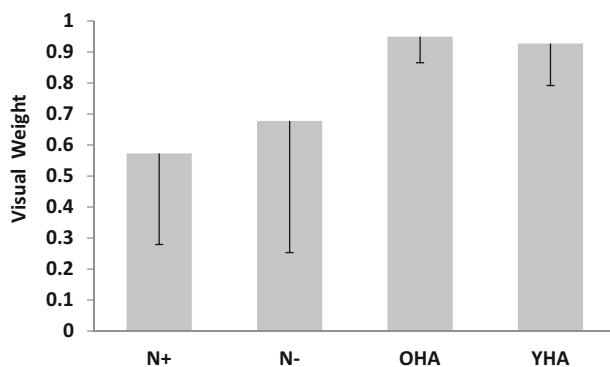


Figure 1 Mean visual weights for the four groups. Black line: standard error. N+, N-, OHA, YHA: neglect, non-neglect, old healthy and young healthy groups, respectively. V, H and VH: visual, haptic and visuo-haptic.

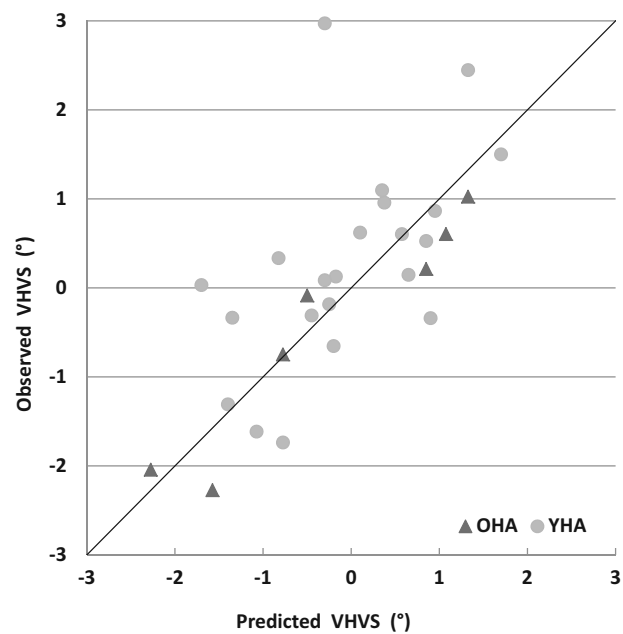


Figure 2 Observed SVHV as a function of predicted SVHV for healthy groups. The black line represents the optimal correlation ($y=x$).

the mean W_v of the neglect group was not different from that of non-neglect group ($P=0.33$), but it differed from those of young ($P<0.01$) and older ($P<0.01$) healthy groups. Mean W_v of non-neglect group was different from that of young ($P=0.02$) and older ($P=0.02$) healthy adults. Finally, W_v was similar in young and older healthy groups ($P=0.83$).

Correlation between estimate and observed performances

From the individual visual and haptic weights and the individual mean performances in the unimodal tasks, the individual predicted visuo-haptic performances were calculated [eq. (3)]. The observed VHSV were plotted against these predicted values (see Figs. 2 and 3). Indeed, most of the points were close to the $y=x$ line, in the healthy adults as well as in the patients. Moreover, the regressions were similar in the different groups. In the patients, $y=0.93x-1.37$ and $r=0.77$ (non-neglect: $r=0.88$; neglect: $r=0.73$). In the healthy adults, $y=0.82x+0.07$ and $r=0.79$ (young: $r=0.57$; older: $r=0.93$).

Comparison of the errors variable.

The Bayesian model tested in the present study predicted a lower uncertainty (lower variance) in the bimodal condition than in the unimodal visual and haptic conditions considered separately. To test this validity criterion, the VH variance was compared to V and H variances. The variance difference V-VH was positive in healthy subjects (0.5 ± 2.3), as well as in the patients (6.5 ± 10.8). Similarly, H-VH was positive in the healthy adults (16.3 ± 24.6) and in the patients (19.8 ± 20.4). The ANOVA revealed an effect of the modality [$F(2, 82)=21.30$, $P<0.01$], which did not depend

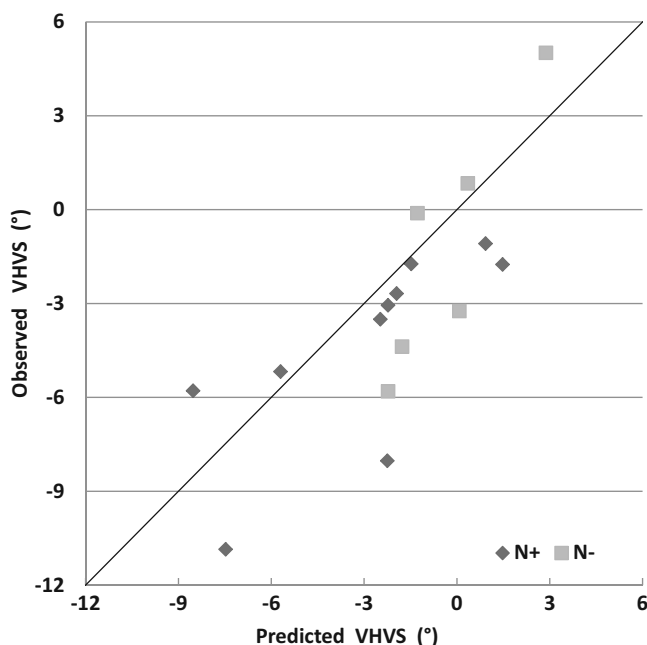


Figure 3 Observed SVHV as a function of predicted SVHV for patients groups. The black line represents the optimal correlation ($y=x$).

on the group [$F(6, 82)=0.81$, $p=0.56$]. Post-hoc comparisons showed that VH variance was greater than H variance ($P<0.01$), but V and VH variances did not differ significantly ($P=0.34$).

Perception of the vertical

In the neglect group, SV was deviated anticlockwise and differed from zero in the three sensory conditions (visual: $-3.9^\circ \pm 4.14^\circ$, $P=0.01$; haptic: $-5.9^\circ \pm 4.3^\circ$, $P<0.01$; visuo-haptic: $-3.0^\circ \pm 3.3^\circ$, $P=0.02$). In the non-neglect group, SV was deviated anticlockwise and differed from zero in the haptic condition ($-4.9^\circ \pm 4.6^\circ$, $P=0.05$), but was closed to the objective vertical in the visual ($+0.5^\circ \pm 3.7^\circ$; $P=0.75$) and visuo-haptic ($-0.3^\circ \pm 1.9^\circ$, $P=0.68$) conditions. The SV of the old healthy adults group was deviated anticlockwise in the haptic condition ($-3.2^\circ \pm 3.3^\circ$, $P=0.03$) but were closed to the objective vertical in the visual ($-0.2^\circ \pm 1.2^\circ$, $P=0.65$) and visuo-haptic ($-0.2^\circ \pm 1.3^\circ$, $P=0.64$) conditions. The SV of the young healthy adults group was deviated clockwise in the haptic condition ($+3.1^\circ \pm 3.1^\circ$, $P<0.01$) but were closed to the objective vertical in the visual ($-0.1^\circ \pm 1.0^\circ$, $P=0.63$) and visuo-haptic ($-0.1^\circ \pm 0.9^\circ$, $P=0.79$) conditions (see Fig. 4).

The ANOVA revealed an effect of the group [$F(3, 41)=14.1$, $P<0.01$], an effect of the sensory condition [$F(2, 82)=8.5$, $P<0.01$] and a significant interaction between the two factors [$F(6, 82)=12.2$, $P<0.01$]. In the neglect group, the SV in the haptic condition was more tilted than in the visuo-haptic condition ($P=0.04$), but the difference with the SV in the visual condition did not reach significance ($P=0.13$). In the non-neglect group, the SV in the haptic condition was more tilted than the SV in the visual and visuo-haptic conditions (both $P<0.01$). In the old healthy adults

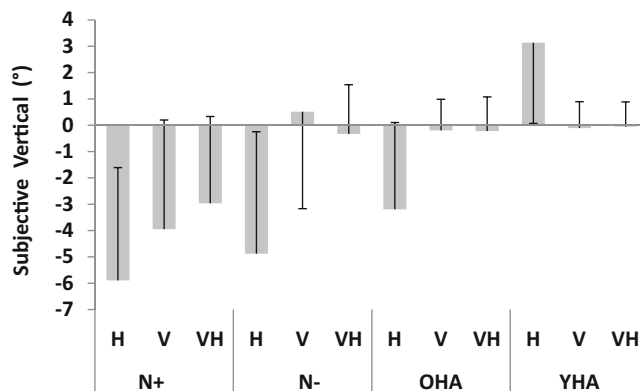


Figure 4 Mean subjective vertical in the three modalities, for the four groups. Black line: standard error. N+, N-, OHA, YHA: neglect, non-neglect, old healthy and young healthy groups, respectively. V, H and VH: visual, haptic and visuo-haptic.

group, the SV in the haptic condition was more tilted than the SV in the visual ($P=0.03$) and visuo-haptic conditions ($P=0.02$). In the young healthy adults group, the SV in the haptic condition was more tilted than the SV in the visual and visuo-haptic conditions (both $P<0.01$).

Discussion

The purpose of the present study was to determine if the VHSV could be predicted from the performances in VSV and the HSV conditions, according to the Bayesian MLE model of multisensory integration [3,4]. Young and older healthy adults together with patients with cerebral lesion, resulting in deficits in spatial cognition or not, were included in order to assess the limits of the model. VHSV was correctly predicted by the MLE model, in the four groups of participants. In the patients groups, the weights of visual and haptic information in the VHSV were similar, whereas in the healthy adults, the visual information had a higher weight than the haptic information. The VHSV was well predicted, despite the fact that SV differed between modalities and between groups. As expected, anticlockwise deviations of the SV were observed in the neglect group in the unimodal as well as in the bimodal conditions. By contrast, in the non-neglect and healthy adults, no deviation was observed in the VSV and VHSV conditions. However, the HSV was tilted anticlockwise in the non-neglect patients and older healthy adults, and tilted clockwise in the young healthy adults.

Multisensory integration in the subjective vertical

Whatever the group of healthy adults, performances in the VHSV condition were correctly predicted from the VSV and HSV weighted by their reliability. As expected, visuo-haptic performances fitted the prediction of the MLE model of optimal multisensory integration in young participants [8] and we showed for the first time that the performances of older also conformed to this model. Furthermore, VHSV variance was smaller than HSV and VSV variances, as predicted by the model [8]. Finally, aging did not seem to affect multisensory processing, at least with respect to orientation task.

In the patients, the weight of the visual information decreased and was closer to the weight of the haptic information than in the healthy adults, in which the weight of the visual information was close to 1. The visuospatial deficits may have increased the uncertainty in the visual system. Despite the lesser weight attributed to the visual information in the patients, the VHSV performance remains well predicted from the VSV and HSV weighted by their relative reliabilities. Thus, the patients appeared to integrate visual and haptic information, as controls do, in order to improve the reliability of multisensory estimate of the subjective vertical. As a consequence, the impact of cerebral lesion and associated visuospatial deficits on integration of multisensory information appeared weak, with respect to orientation processing. This result is striking since it is assumed that deficits in multiple tasks and different sensory modalities usually reflect an impaired multisensory integration [6]. The present study suggests that despite the presence of substantial visuospatial deficits in right brain-damaged patients, leading to an asymmetrical perception of spatial properties, the integration of visual and haptic information is relatively preserved. Multimodal integration does not seem thus to depend only on right posterior cortical areas.

Vertical perception

In the young and older healthy adults, VSV was close to the true vertical direction: this measure is known to be very accurate with errors of less than one degree [20]. VHSV for these two groups was also close to the true vertical direction and thus to the VSV. Moreover, the visual information was predominantly used in the visuo-haptic condition, as expected since the visual information was not altered [3,4]. On the contrary, HSV was slightly deviated for the young and older healthy adults and, surprisingly, performances were significantly different from the true vertical direction. The normal range of the HSV was reported to be between $\pm 4.5^\circ$ [23], although studies on the HSV generally show performances closer to the true vertical direction (e.g. [18]: $-0.15^\circ \pm 0.42^\circ$ in young healthy participants). In our study, the method used limited the exploration of the bar, and this could be responsible for the observed deviation. However, the direction of the deviation was opposite in the two groups of healthy participants with a clockwise deviation in the young adults and an anticlockwise deviation in the older adults. In the past, very few studies on spatial orientation have compared the performances of young and older participants: the previous studies included either young adults, mainly to investigate theoretical issues, or old adults (generally older than 50 years) to investigate neuropsychological issues. In a meta-analysis dealing with line bisection performances, Jewell and McCourt [12] showed that young adults tend to deviate leftward when marking the centre of a line, while older adults tend to deviate to the right. This effect of age, analog to that we observed in the haptic condition, was interpreted as an age-related decreased in the ability of the right hemisphere to allocate spatial attention.

Concerning the non-neglect group, VSV and VHSV were close to the true vertical direction as expected. Though they had cerebral lesions, they generally did not show vis-

uospatial deficits. Concerning the neglect group, VSV and VHSV were tilted anticlockwise as usually found in patients with visuospatial deficits such as neglect or hemianopia [14,27,30]. These perceptual biases can be due to a deficit in the central representation of the gravity following posterior lesions [25]. It can also result from a postural disorder [23,28] or a visuospatial deficit [30]. It can finally be associated to a perturbed spatial representation due to an impaired integration of sensory signal in the damaged brain [5].

Interestingly, HSV was significantly tilted anticlockwise for the non-neglect and more tilted anticlockwise than the other modalities for the neglect group. This result contrasts with the outcome of previous studies showing that, when the head was kept straight, HSV did not differ from VSV in right brain damage patients without neglect signs [6,23]. In these two studies, exploration of the bar was encouraged while in the present study; the exploration of the bar was not allowed (the bar was held in its centre). We may speculate that in absence of visual information, the limited haptic information available in the present study was not sufficient to accurately perceive the verticality.

In conclusion, the SV was anticlockwise deviated in the neglect group, for the three modalities. In the non-neglect patients and in healthy adults, VSV and VHSV were close to the true vertical, whereas HSV was anticlockwise deviated in the non-neglect patients and the older healthy adults and clockwise for the young healthy adults. Despite these differences, the integration of visual and haptic information was statistically optimal, which means that the central nervous system privileged the more reliable system and gave it a greater weight in the multisensory performance. As a result, the uncertainty of the multimodal performance was lesser than that of unimodal performances. The older adults also integrated visual and haptic information in this optimal way. After right hemispheric stroke, this ability was still preserved even when participants suffered from visuospatial deficits. Whether re-education programs would benefit from using multimodal stimuli instead of the usual visual ones remains an open issue.

Disclosure of interest

The authors declare that they have no conflicts of interest concerning this article.

Acknowledgement

B. Braem received a grant from the "Société Francophone Posture, Équilibre, Locomotion" for the present work.

References

- [1] Bonan I, Guettard E, Leman M, Colle F, Yelnik A. Subjective visual vertical perception relates to balance in acute stroke. *Arch Phys Med Rehabil* 2006;87:642–6.
- [2] Brandt T, Dieterich M, Danek A. Vestibular cortex lesions affect the perception of verticality. *Ann Neurol* 1994;35:403–12.
- [3] Ernst MO. A Bayesian view on multimodal cue integration. In: Knoblich G, Thornton IM, Grosjean M, Shiffrar M, editors.

- Human body perception from the inside out. New York: Oxford University Press; 2006. p. 105–31.
- [4] Ernst MO, Banks MS. Humans integrate visual and haptic information in a statistically optimal fashion. *Nature* 2002;415:429–33.
 - [5] Funk J, Finke K, Müller HJ, Preger R, Kerkhoff G. Systematic biases in the tactile perception of the subjective vertical in patients with unilateral neglect and the influence of upright vs supine posture. *Neuropsychologia* 2010;48:298–308.
 - [6] Funk J, Finke K, Müller HJ, Utz KS, Kerkhoff G. Effects of lateral head inclination on multimodal spatial orientation judgments in neglect: Evidence for impaired spatial orientation constancy. *Neuropsychologia* 2010;48:1616–27.
 - [7] Gauthier L, Dehaut F, Joanne Y. The bells test: a quantitative and qualitative test for visual neglect. *Int J Clin Neuropsychol* 1989;11:49–54.
 - [8] Gori M, Viva MD, Sandini G, Burr DC. Young children do not integrate visual and haptic form information. *Curr Biol* 2008;18:694–8.
 - [9] Harris CM, Wolpert DM. Signal-dependent noise determines motor planning. *Nature* 1998;394:780–4.
 - [10] Heilman KM. Neglect and related disorders. In: Heilman KM, Valenstein E, editors. *Clinical Neuropsychology*. New York: Oxford University Press; 1979. p. 268–70.
 - [11] Heller MA. Haptic dominance in form perception with blurred vision. *Perception* 1983;12:607–13.
 - [12] Jewell G, McCourt ME. Pseudoneglect: a review and meta-analysis of performance factors in line bisection tasks. *Neuropsychologia* 2000;38:93–110.
 - [13] Karnath H, Ferber S, Dichgans J. The origin of contraversive pushing. Evidence for a second graviceptive system in humans. *Neurology* 2000;55:1298–304.
 - [14] Kerkhoff G. Multimodal spatial orientation deficits in left-sided visual neglect. *Neuropsychologia* 1999;37:1387–405.
 - [15] Knill DC, Pouget A. The Bayesian brain: the role of uncertainty in neural coding and computation. *TINS* 2004;27:712–9.
 - [16] Körding KP, Wolpert DM. Bayesian integration in sensorimotor learning. *Nature* 2004;427:244–7.
 - [17] Lederman SJ, Klatzky RL. Extracting object properties through haptic exploration. *Acta Psychol* 1993;84:29–40.
 - [18] Luyat M, Moroni C, Gentaz E. The role of contextual cues in the haptic perception of orientations and the oblique effect. *Psychon Bull Rev* 2005;12:760–6.
 - [19] Luyat M, Ohlmann T, Barraud PA. Subjective vertical and postural activity. *Acta Psychol* 1997;95:181–93.
 - [20] Mann CW. Visual factors in the perception of verticality. *J Exp Psychol* 1952;44:460–6.
 - [21] Ogden JA. Anterior-posterior interhemispheric differences in the loci of lesions producing visual hemineglect. *Brain Cogn* 1985;4:59–75.
 - [22] Oldfield RC. The assessment and analysis of handedness: The Edinburgh inventory. *Neuropsychologia* 1971;9:97–113.
 - [23] Pérennou DA, Mazibrada G, Chauvineau V, Greenwood R, Rothwell J, Gresty MA, et al. Lateropulsion, pushing and verticality perception in hemisphere stroke: a causal relationship? *Brain* 2008;131:2401–13.
 - [24] Rock I, Victor J. Vision touch: an experimentally created conflict between the two senses. *Science* 1964;143:594–6.
 - [25] Rousseaux M, Honoré J, Vuilleumier P, Saj A. Neuroanatomy of space, body, and posture perception in patients with right hemisphere stroke. *Neurology* 2013;81:1291–7.
 - [26] Saj A, Honoré J, Bernati T, Coello Y, Rousseaux M. Subjective visual vertical in pitch and roll in right hemispheric stroke. *Stroke* 2005;36:588–91.
 - [27] Saj A, Honoré J, Bernati T, Rousseaux M. Influence of spatial neglect, hemianopia and hemispace on the subjective vertical. *Eur Neurol* 2012;68:240–6.
 - [28] Saj A, Honoré J, Coello Y, Rousseaux M. The visual vertical in the pusher syndrome: influence of hemispace and body position. *J Neurol* 2005;252:885–91.
 - [29] Schenkenberg T, Bradford DC, Ajax ET. Line bisection and unilateral visual neglect in patients with neurologic impairment. *Neurology* 1980;30:509–17.
 - [30] Utz KS, Keller I, Artinger F, Stumpf O, Funk J, Kerkhoff G. Multimodal and multispatial deficits of verticality perception in hemispatial neglect. *Neuroscience* 2011;188:68–79.
 - [31] van Beers RJ, Sittig AC, van der Gon JJD. Integration of proprioceptive and visual position-information: An experimentally supported model. *J Neurophysiol* 1999;81:1355–64.
 - [32] Welch R, Warren D. Intersensory interactions. In: Kaufman KR, Thomas JP, editors. *Sensory Processes and Perception. Handbook of Perception and Human Performance, Volume 1*. New York: Wiley; 1986. p. 1–36.
 - [33] Yelnik AP, Lebreton FO, Bonan IV, Colle FM, Meurin FA, Guichard JP, et al. Perception of verticality after recent cerebral hemispheric stroke. *Stroke* 2002;33:2247–53.

Annexe 2 : Saj, A., Honoré, J., Braem, B., Bernati, T., Rousseaux, M. (2012b). Time since stroke influences the impact of hemianopia and spatial neglect on visual-spatial tasks. *Neuropsychology*, 26(1): 37-44.

Time Since Stroke Influences the Impact of Hemianopia and Spatial Neglect on Visual-Spatial Tasks

Arnaud Saj

Geneva University Hospital, Geneva, Switzerland
and University of Geneva

Jacques Honoré

University of Lille Nord de la France

Béranger Braem, Thérèse Bernati, and Marc Rousseaux

Centre Hospitalier Universitaire and University of Lille Nord de la France

Objective: Spatial neglect results in an ipsilesional misorientation of attention in visual-spatial tasks. Hemianopia impairs visual perception but its influence on visual-spatial tasks is subject to debate. Here, we investigated the influence of the time since stroke on the respective impacts of hemianopia and spatial neglect. **Method:** A total of 29 patients with a right hemisphere stroke were included in the study. Nine had severe neglect and hemianopia, six had severe neglect only, four showed hemianopia with little or no neglect after infarction of the posterior cerebral artery, and 10 had neither neglect nor hemianopia. We investigated the spatial bias in the subjective straight ahead (SSA) test and in clinical tests (bell cancellation, line bisection, and scene copy). Each task was administered twice (at S1 and S2: 41.4 and 67.2 days [on average] after the stroke, respectively). **Results:** At S1, spatial neglect and hemianopia had an additive influence on SSA test performance (rightward translation). Similar rightward biases were observed in the clinical tests. At S2, the influence of hemianopia had disappeared, whereas that of neglect was still present. Furthermore, loss of bias in the SSA test correlated with the improvements seen in most of the clinical tests. **Conclusions:** In patients with recent stroke, hemianopia aggravates the visual-spatial bias when neglect is present or may lead to visual-neglect-like behavior when classically defined neglect is absent. However, the influence of hemianopia disappears relatively quickly over time, due to compensation.

Keywords: stroke recovery, spatial neglect, hemianopia, subjective straight ahead test, visual-spatial tasks

Unilateral brain damage can lead to two main visual-spatial disorders. Visual field defects (hemianopia, quadrupia) result from lesions to the optic tract and/or striate cortex and impair the primary perception of contralesional visual information. Spatial neglect is a consequence of damage to the parietofrontal attentional system, with patients failing to orient or attend to personal and peripersonal contralesional spaces (Heilman & Valenstein, 1979). Although field defects and spatial neglect have different impacts on visual processing and clinical tests, it can be difficult to differentiate between the two phenomena (Kooistra & Heilman, 1989; Vallar, Sandroni, Rusconi, & Barbieri, 1991). In line bisection, patients with neglect typically show a reproducible, ipsilesional deviation (Barton & Black, 1998), whereas patients with pure hemianopia or quadrupia display a contralesional shift (i.e., to the left after a right-side brain lesion) (Liepmann & Kalms, 1900; Barton & Black, 1998; Doricchi, Onida, & Guariglia, 2002;

Zihl, Sämann, Schenk, Schuett, & Dauner, 2009; Kuhn, Heywood, & Kerkhoff, 2010; Schuett, Dauner, & Zihl, 2011). The origin of the latter error is subject to debate (for a review, see Kerkhoff & Schenk, 2011). Some authors suggest the presence of strategic adaptation of visual attention to the blind hemispace; that is, a direct consequence of perceptual disorders (Barton & Black, 1998; Doricchi, Onida et al., 2002), in conjunction with an overall shift in eye fixation toward the contralesional side (Barton, Behrmann, & Black, 1998). Other researchers suggest that extrastriate lesions of the inferior occipitotemporal cortex have a role (Zihl, 2000; Zihl et al., 2009). A possible influence of the time since stroke has also been considered, with diverging results. In fact, time had no influence in a series of patients who were explored at three time points after brain injury (Zihl et al., 2009). Conversely, Machner, Sprenger, Hansen, Heide, and Helmchen (2009) reported a significant, ipsilesional shift in patients investigated in the month following stroke—in contrast to the usual contralesional deviation. In the Subjective Straight Ahead (SSA) test assessment, the initial studies reported an ipsilesional deviation in pure neglect and a contralesional shift in pure hemianopia (Ferber & Karnath, 1999; Lewald, Peters, Tegenthoff, & Hausmann, 2009). However, a recent study (Saj, Honoré, Richard, Bernati, and Rousseaux (2010) found an ipsilesional shift in patients with neglect or hemianopia, most of whom had been assessed in the first 3 months poststroke.

Additional information has been provided by comparing patients with pure neglect with patients with combined neglect and hemianopia. Several authors have reported more severe disorders in the second situation, especially for line bisection, symbol can-

Arnaud Saj, Department of Neurology, Geneva University Hospital, Geneva, Switzerland, and Faculty of Medicine, University of Geneva; Jacques Honoré, Equipe d'Accueil 4559, University of Lille Nord de la France; Béranger Braem, Thérèse Bernati, and Marc Rousseaux, Service de Rééducation Neurologique, Centre Hospitalier Universitaire and University of Lille Nord de la France.

Correspondence concerning this article should be addressed to Marc Rousseaux, Service de Rééducation Neurologique, Hôpital Swynghedauw, CHRU, F-59037 Lille cedex, France. E-mail: marc.rousseau@chru-lille.fr

cellation (Doricchi, Galati, DeLuca, Nico, & D'Olimpio, 2002; Rousseaux, Bernati, Saj, & Kozlowski, 2006) and the SSA test (Saj et al., 2010). However, other studies failed to identify clear differences (Halligan, Marshall, & Wade, 1990; Farnè, Ponti, & Ladavas, 1998).

It must be emphasized that most studies in this field examined patients a long time after stroke (usually more than 3 months). This may explain (at least in part) discrepancies in line bisection and SSA results and size perception in ipsilesional and contralesional spaces (Doricchi, Onida et al., 2002). In fact, the influence of time since stroke is poorly understood and requires further investigation. Furthermore, the purely temporal effect can be associated with the development of compensatory strategies in patients undergoing rehabilitation.

In the present study, we studied a relatively large group of stroke patients with or without neglect and/or hemianopia at two different time points during their inpatient rehabilitation care. Our first hypothesis was that at the initial assessment (performed less than 3 months after the stroke), both neglect and hemianopia would result in an ipsilesional visual shift (Machner, Sprenger, Hansen et al., 2009). Furthermore, patients with pure hemianopia (and occipital lesions) would show neglect-like visual behavior and patients with both neglect and hemianopia would show more severe deviations than those with pure neglect. Our second hypothesis was that at the second assessment (performed a few weeks later, during the rehabilitation process), the ipsilesional shift in hemianopic patients would have decreased or disappeared.

Method

Participants

Patients having suffered an MRI-confirmed, right-side cerebral stroke (time since stroke: 32–150 days) were included in the study after providing their written, informed consent. The study was performed in accordance with the Declaration of Helsinki and institutional guidelines.

Four subgroups were defined according to the patients' performance levels in clinical and instrumental tests and their lesion location: (i) patients with severe neglect, hemianopia, and lesions principally involving the middle cerebral artery (MCA) territory (the "N+H+" group), (ii) patients with severe neglect, no hemianopia, and lesions principally involving the MCA territory (the "N+H−" group), (iii) patients with no neglect, no hemianopia, and lesions in the MCA territory (the "N−H−" group) and (iv) patients with hemianopia, little or no neglect, and lesions in the posterior cerebral artery (PCA) territory (the "N−H+" group). The latter group did not display any lesions in the lower parietal and superior temporal cortices and the adjacent white matter (damage to which is considered to be the main source of spatial neglect).

Patients were defined as having neglect when they showed subnormal performance in at least two of the three following tests: line bisection (cut-off: rightward deviation >11%) (Schenkenberg, Bradford & Ajax, 1980), scene copy (cut-off: score ≥ 1 out of 4) (Ogden, 1985), and bell test (cut-off: left–right omissions ≥ 4 out of 15 omissions) (Gauthier, Dehaut & Joanne, 1989). Cut-off scores were obtained from normative data ($p \leq .01$; Schenkenberg et al., 1980; Rousseaux et al., 2001). Visual field defects were assessed clinically and instrumentally. In the clinical test, the patient had to detect and discriminate 2-s finger movements (two

trials) from catch trials (two trials) in each quadrant, following demonstration of movement and no movement in the preserved hemifield. We considered that hemianopia was probable when a "no" response was repeatedly produced. The visual field was examined instrumentally using kinetic Goldmann perimetry (Metrovision, Pérenchies, France) under monocular conditions and with a chin support. Patients had to fixate a central point and press a button if they detected any movement of a peripheral target. The target velocity was 5°/s in the peripheral visual field and 2°/s in the central visual field. Given the difficulty in differentiating between neglect and hemianopia, we only included patients with complete hemianopia in Goldmann perimetry.

We analyzed the stroke damage on MRI. Lesions were reconstructed on axial slices using MRIcro (Rorden & Brett, 2000) and were then superimposed on a T2 MRI template to give side views. Each patient's lesion volume (in pixels) was then calculated.

Nine patients had severe neglect and hemianopia (Table 1) (N+H+; mean \pm SD age: 62.0 ± 14.3), six had severe neglect but not hemianopia (N+H−; age: 55.3 ± 10.0 years), four had hemianopia but not neglect (N−H+; age: 51.0 ± 17.3 years) and 10 showed neither neglect nor hemianopia (N−H−; age: 58.9 ± 12.9). The groups did not differ significantly (in Kruskal Wallis and χ^2 tests) in terms of age ($p = .728$), educational level ($p = .845$) or gender ($p = .935$). In the N+H+ group, Goldmann perimetry revealed total hemianopia in the absence of macular sparing. Visual field defects were similar for both eyes in six cases and slightly more severe in one eye in three other. Monocular visual acuity was above 7/10 for all participants in the N+H+ and N+H− groups. In the N−H+ group, hemianopia was total and slightly more severe in one eye in two cases. Visual acuity was low (5/10) in one case and completely or relatively unaffected in the three others (>7/10). None of the patients displayed peripheral oculomotor disorders. Several of these patients had been included in previous studies (Saj, Honoré, Davroux, Coello, & Rousseaux, 2005; Saj, Honoré, Richard, Bernati, & Rousseaux, 2008; Saj et al., 2010), having shown that (i) the contralesional subjective vertical tilt and the SSA test deviation in neglect patients are both greater in the sitting position than in the supine position, and (ii) hemianopia increases the ipsilesional error in the SSA test when patients are tested in the first 3 months poststroke.

There were more extensive lesions in the posterior temporal-occipital area in the N+H+ group than in the N+H− group (see Figure 1). As mentioned above, patients without neglect or hemianopia (the N−H− group) did not have lesions in the parietal and occipital areas. The N−H+ patients had predominantly occipital lesions.

All subjects were tested in two sessions (S1 and S2); S1 started an average of 41.4 ± 16.3 days after stroke onset and S2 started an average of 25.8 ± 13.6 days after the start of S1. The stroke-test time intervals were similar in the subgroups (Kruskal Wallis: $p = .246$ and $p = .461$ for S1 and S2, respectively). Test presentation was completed in 3 to 6 days. Clinical examination of the visual field was repeated at S2 and all patients still showed severe hemianopia.

Instrumental and Clinical Assessments

We used both instrumental and clinical tasks. The first task was an SSA test. We used a visual-manual adjustment test with proven sensitivity to lateral spatial bias (Saj et al., 2008). Paper-and-pencil

Table 1
Patient Presentation

Group	Age	Sex	Years of schooling	Scene copy (0–4)	Bell cancellation (omissions)			Line bisection (% deviation)
					L	C	R	
N+H+	66	F	7	4	15	5	5	66.6
N+H+	48	M	10	4	15	5	4	70.7
N+H+	51	M	22	4	15	5	9	90.9
N+H+	79	F	20	4	13	3	2	83.1
N+H+	42	M	12	4	15	5	4	60.4
N+H+	61	M	7	4	15	5	7	83.1
N+H+	54	F	9	0	10	2	4	56.0
N+H+	78	F	11	4	15	5	4	83.0
N+H+	79	F	6	4	9	2	0	85.2
N+H–	65	M	14	3	10	2	1	62.6
N+H–	40	F	8	0	15	5	0	24.4
N+H–	56	M	12	4	15	2	2	83.0
N+H–	64	F	8	4	8	2	0	42.2
N+H–	47	F	17	0	7	1	0	32.0
N+H–	60	M	13	4	10	2	1	42.9
N–H+	70	M	8	1	6	1	0	5.4
N–H+	28	F	16	3	8	2	0	7.3
N–H+	52	M	10	2	4	1	1	10.3
N–H+	54	F	10	1	1	0	0	10.8
N–H–	63	F	8	0	6	0	0	9.5
N–H–	36	M	16	0	0	0	0	18.3
N–H–	66	F	7	0	4	1	0	9.5
N–H–	84	M	10	0	0	0	0	–6.9
N–H–	53	F	12	0	0	0	0	–2.3
N–H–	61	M	16	0	3	0	0	1.7
N–H–	67	M	8	0	1	0	0	–3.6
N–H–	47	F	14	1	0	0	0	8.3
N–H–	53	H	12	0	1	0	0	7.9
N–H–	59	M	17	0	1	0	0	7.6

tests were introduced because they are typically used for investigating spatial neglect in a clinical setting.

Subjective straight-ahead. Participants sat on a medical examination table with their legs extended horizontally and their back supported at an angle of 10° to the vertical (see Figure 2). The head was held in line with the trunk axis by a headrest with lateral stabilizers. A luminous metal rod (25-cm long and 1.5-cm square) was placed 50 cm in front of the participant. The rod could be both rotated and translated rightward or leftward along a horizontal slit.

Translation movements were coded by a potentiometer. A value of 0 indicated that the center of the rod was in the subject's midsagittal plane and a positive value corresponded to a rightward displacement. Light-emitting diodes (2-cm long and 0.5-cm wide) were inserted in the side of the rod facing the participant. Adjustments were carried out in darkness. The patient was instructed to handle the center of the rod with his or her right hand only. With the exception of the rod (as required), all parts of the apparatus were centered on the participant's midsagittal line. The task consisted in aligning the rod along a subjective, straight-ahead line starting at the navel and extending away from the trunk. Depending on the trial, the rod axis was initially translated by –15, 0 or + 15 cm and rotated by –45°, 0° or + 45°. The participant was required to close his or her eyes when these initial translational and rotational positions were being set. Two trials were run for each of the nine initial positions (3 translations × 3 rotations). An intertrial interval of about 20 seconds was always applied.

Clinical tests. Our clinical assessment comprised three paper-and-pencil tests. In the bells test (Gauthier et al., 1989), the participant is required to find and circle 35 bell targets distributed within a cloud of distractors printed on a sheet of paper placed on the table in front of him/her. In fact, the 35 bells are arranged in seven columns of 5, with three columns on the right, three columns on the left and one central column. We measured the number of left-side omissions (out of 15). The line bisection test (Schenkenberg et al., 1980) consists in bisecting a series of 20 lines on a sheet of paper placed horizontally in front of the participant. The lines vary from 10 to 20 cm in length and are distributed across three spatial locations: center, left, and right. We measured the distance between the bisection mark and the center of the line and calculated the mean percentage deviation. By convention, rightward deviation was given a positive score. The scene copying test (Ogden, 1985) involves reproducing a complex figure composed of four horizontally located objects: a fir tree, a fence, a house, and another tree. The result is scored from 0 (no omissions) to 4 (omission of the left tree and one half of another element).

Statistical Analysis

Analyses of variance (ANOVAs) were performed with Statistica software (StatSoft, Maisons-Alfort, France) by considering the mean values of the SSA translation error (cm), the percentage deviation in line bisection, left omissions in the bells test, and

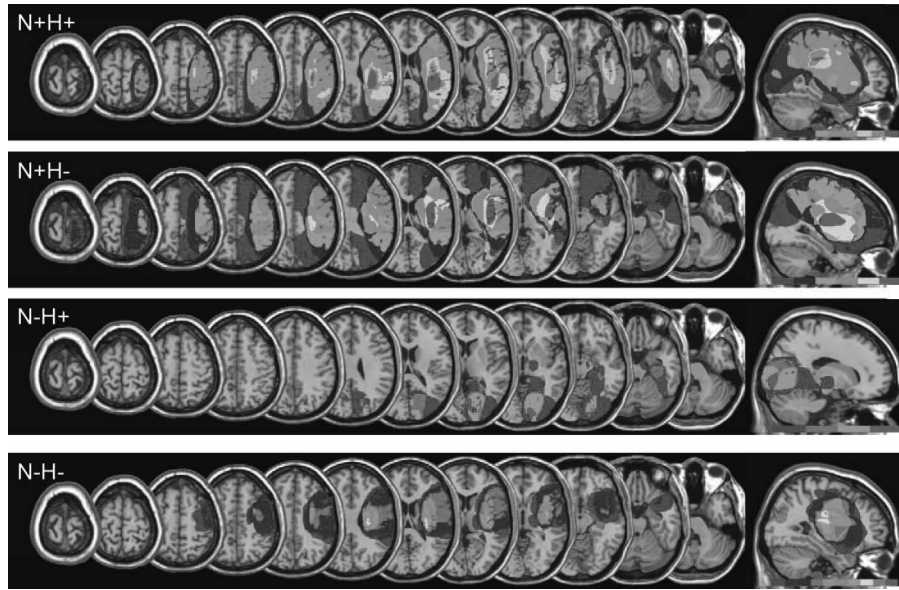


Figure 1. Overlay lesion plot of the patients with neglect and hemianopia (N+H+), neglect without hemianopia (N+H-), hemianopia without neglect (N-H+), or no neglect or hemianopia (N-H-). The number of overlapping lesions is indicated by different colors, from violet to red.

severity of left omissions in scene copying. Given the relatively small number of N-H+ patients, we rank-transformed the data prior to analysis. We analyzed the influence of the factors *group* (N+H+, N+H-, N-H+, N-H-) and *session* (S1, S2), with *lesion size* as a covariance factor. Post hoc comparisons were performed with the Newman-Keuls correction. Correlations were analyzed with Spearman's t test. The threshold for statistical significance was set to $p \leq .05$.

Results

The Subjective Straight-Ahead Test

Analysis of the translation error revealed a significant, main effect of *group* ($p < .0001$) and *session* ($p = .005$) and a



Figure 2. Apparatus and patient positioning for the subjective straight-ahead test.

significant *group* \times *session* interaction ($p = .042$) (see Figure 3). There was no effect of *lesion size* ($p = .358$). At S1, the mean rightward deviation of the N+H+ (6.1 ± 1.7 cm) was greater than that found in the other groups. The magnitude of this difference did not reach statistical significance for the N+H- (4.4 ± 1.2 cm; $p = .128$) and N-H+ (4.1 ± 0.6 cm; $p = .199$) groups but did for the N-H- group (0.9 ± 1.8 cm; $p < .0001$). The N+H- differed significantly from the N-H- group ($p = .003$) but not from the N-H+ group ($p = .862$). The N-H+ group differed significantly from the N-H- group ($p = .005$). At S2, the mean translation in the N+H+ group (4.2 ± 2.1 cm) was similar to that observed in the N+H- group (4.2 ± 1.1 cm; $p = .992$) but was significantly greater than the values in the N-H+ (0.2 ± 0.9 cm; $p = .0005$) and N-H- (0.8 ± 1.6 cm; $p = .002$) groups. The N+H- group differed significantly from the N-H+ ($p = .0004$) and N-H- ($p = .001$) groups. The N-H+ group did not differ from the N-H- ($p = .713$) group. Furthermore, the rightward

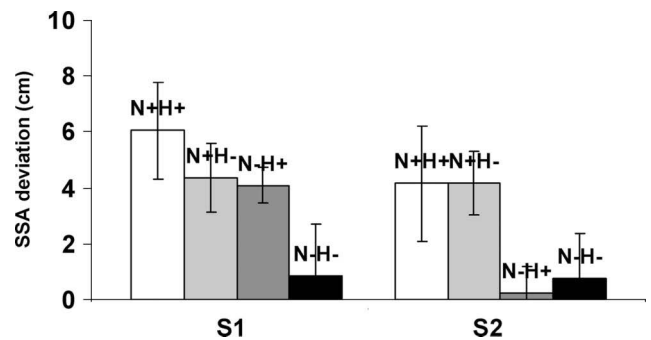


Figure 3. Lateral translation of the subjective straight-ahead (cm): mean value and standard error in the four groups at the first (S1) and second (S2) assessments.

error decreased at S2 (relative to S1) in the N-H+ group ($p = .001$) but not in the N+H+ ($p = .225$), N+H- ($p = .989$) and N-H- groups ($p = .986$). In addition, the rod's *initial translation* ($p = .501$) and *initial rotation* ($p = .70$) of the rod had no main effect. However, the initial translation was found to interact with *group* ($p = .041$) because the rightward error in the N+H+ group was more severe when participants started from the right (6.2 cm) than when they started at the center (4.7 cm) or from the left (4.4 cm). The *group* \times *session* \times *initial translation* interaction was not statistically significant ($p = .816$). A within-group analysis of the individual datasets showed that 3 of the 9 N+H+ patients, 1 of the 6 N+H- patients and all 4 N-H+ patients had a greater improvement in translation at S2 (relative to S1) than those in the N-H- group did, on average (95% confidence interval for the S2-to-S1 change in this group: -2.08 – 1.91). In terms of the S1-to-S2 change, 6 of the 9 N+H+ participants and 4 of the 6 N+H- participants were stable and one N+H- patient showed a greater error size.

The Bell Test

Left omissions were correlated with *group* ($p < .0001$) and *session* ($p < .0001$) (see Figure 4) but not with the *group* \times *session* interaction ($p = .100$) or *lesion size* ($p = .506$). At S1, the omission rate was significantly higher in the N+H+ (13.6 ± 2.4) group than in the N-H+ (4.7 ± 3.0 ; $p = .0004$) and N-H- (1.6 ± 2.1 ; $p = .0001$) groups. The difference with the N+H- group was not significant (10.8 ± 3.4 ; $p = .267$). The N+H- group differed significantly from the N-H- ($p = .0001$) and N-H+ ($p = .006$) groups. The N-H+ group differed significantly from the N-H- ($p = .003$) group. At S2, the omission rates in the N+H+ (8.7 ± 3.7) and N+H- (9.5 ± 4.6 ; $p = .775$) groups were similar but both were significantly higher than those observed in the N-H+ (0.2 ± 0.5 ; $p = .0001$ in both cases) and N-H- (0.0 ± 0.0 ; $p = .0001$ in both cases) groups. The latter two groups did not differ significantly ($p = .323$). The omission rate at S2 (relative to S1) fell in the N-H+ ($p = .0001$) and N-H- ($p = .014$) groups but not in the N+H+ ($p = .101$) and N+H- ($p = .352$) groups. Analysis of individual datasets showed that 4 of the 9 N+H+ patients, 0 of the 6 N+H- patients and 2 of the 4 N-H+ patients had a greater reduction in left omissions at S2 (relative to S1) than those in the N-H- group did, on average (95% confidence interval for the S2-to-S1 change in this group: -5.65 – 2.45). In terms of the S2-to-S1 change, 5 of the 9 N+H+ patients, 6 of the 6 N+H-

patients and 2 of the 4 N-H+ patients showed improvement similar to that of the N-H- group.

The Line Bisection Test

Line bisection error showed a main effect of *group* ($p < .0001$) and *session* ($p = .0007$) but no *group* \times *session* interaction ($p = .903$) (see Figure 5) or an effect of *lesion size* ($p = .193$). At S1, the rightward deviation of the N+H+ group ($75.4 \pm 12.3\%$) was greater than that observed in the N+H- ($47.8 \pm 21.5\%$; $p = .030$), N-H+ ($8.4 \pm 2.5\%$; $p = .0001$) and N-H- ($6.0 \pm 7.4\%$; $p < .0001$) groups. The N+H- group differed significantly from the N-H+ ($p = .0001$) and N-H- ($p < .0001$) groups. The N-H+ group did not differ from the N-H- group ($p = .151$). At S2, the deviation in the N+H+ group ($50.7 \pm 19.1\%$) did not differ significantly from that observed in the N+H- group ($31.7 \pm 17.7\%$; $p = .109$) but remained significantly greater than that of the N-H+ ($3.5 \pm 4.2\%$; $p = .0001$) and N-H- ($0.9 \pm 4.9\%$; $p < .0001$) groups. Deviation was significantly more severe in the N+H- group than in the N-H+ ($p = .001$) and N-H- ($p < .0001$) groups. The N-H+ and N-H- groups did not differ significantly ($p = .288$). Furthermore, the deviation decreased significantly at S2 (relative to S1) in the N+H+ group ($p = .027$) but not in the N+H- ($p = .109$), N-H+ ($p = .183$), and N-H- ($p = .345$) groups. Individual dataset analyses showed that 6 of the 9 N+H+ patients, 2 of the 6 N+H- patients and none of the 4 N-H+ patients showed a greater reduction in the translation error at S2 (relative to S1) than patients in the N-H- group, on average (95% confidence interval for the S2-to-S1 change in this group: -17.99 – 9.89). At S2, 3 of the 9 N+H+ patients, 4 of the 6 N+H- patients, and 4 of the 4 N-H+ patients were similar to those in the N-H- group.

The Scene Copy Test

The severity of omissions was correlated with *group* ($p < .0001$), *session* ($p = .027$) and *lesion size* ($p = .021$) but there was no *group* \times *session* interaction ($p = .098$) (see Figure 6). At S1, the mean score in the N-H- group (0.1 ± 0.3) differed significantly from that of the N+H+ (3.6 ± 1.3 ; $p < .0001$), N+H- (2.2 ± 2.0 ; $p = .003$), and N-H+ (1.7 ± 1.0 ; $p = .0006$) groups. The latter three groups did not differ significantly. At S2, the N+H+ (2.7 ± 1.4) and the N+H- (2.3 ± 1.9 ; $p = .460$) were similar in terms of omission severity but differed significantly from the N-H+ (0.3 ± 0.5 ; $p = .0005$ and 0.005 , respectively) and N-H- (0.0 ± 0.0 ; $p = .0001$ and 0.005 , respectively) groups. The N-H+ and N-H- groups did not differ significantly ($p = .551$). At S2, the score improved (relative to S1) in the N-H+ group ($p = .002$) but not in the N+H+ ($p = .823$), N+H- ($p = .897$), and N-H- ($p = .677$) groups. Individual dataset analyses revealed that 4 of the 9 N+H+ patients, 1 of the 6 N+H- patients and all 4 of the N-H+ patients had a greater reduction in omissions severity at S2 (relative to S1) than those in the N-H- group, on average (95% confidence interval for the S2-to-S1 change in this group: -0.65 – 0.48). At S2, 5 of the 9 N+H+ patients, 5 of the 6 N+H- patients, and none of the 4 N-H+ were similar to those in the N-H- group.

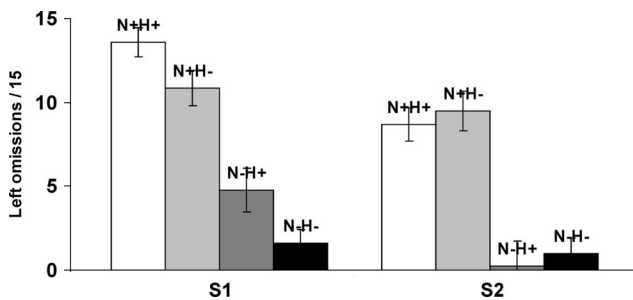


Figure 4. Number of left omissions in the bells test (out of 15): mean value and standard error in the four groups at the first (S1) and second (S2) assessments.

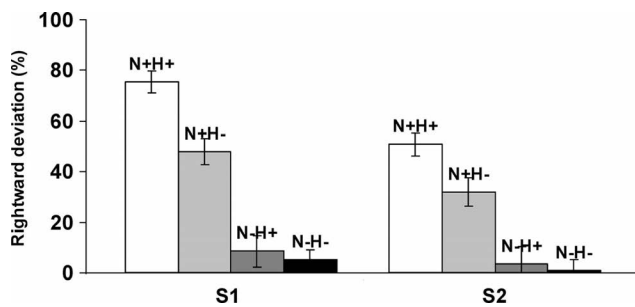


Figure 5. Percentage deviation in the line bisection test: mean value and standard error in the four groups at the first (S1) and second (S2) assessments.

Between-Task Correlations

We found significant correlations between the reduction in the SSA bias (difference between S2 and S1) and the recovery in the bell test ($r = .484$, $p = .008$) and the scene copy test ($r = .61$, $p < .0001$). The correlation was not significant for line bisection ($r = .102$, $p = .597$). Furthermore, the reduction in the SSA bias did not correlate with age, education level, or time since stroke at S1.

Discussion

In this study, hemianopia and spatial neglect exerted relatively similar, additive effects at the examination (S1) performed within the first few months poststroke. However, the influence of hemianopia disappeared at the second examination (S2), and so neglect was the main remaining source of visual-spatial impairments. Our observations (at least those at S1) differed somewhat from the contralesional bias reported in patients who were explored at a relatively long time intervals after stroke. In fact, these findings may be coherent and suggest that the initially ipsilesional shift induced by hemianopia progressively becomes contralesional—meaning that the net effect of hemianopia is difficult to establish at any given point in time.

The influence of hemianopia appeared to be relatively similar to that of spatial neglect but was less intense. This influence was observed in two different groups: patients with spatial neglect and hemianopia (when compared with patients with pure neglect) and patients with pure hemianopia (when compared with patients without neglect nor hemianopia). All patients with pure hemianopia had an infarction in the PCA area with unaffected inferior parietal and superior temporal lobules—damage to which is the classical source of neglect. Hence, there may have been a direct influence of the primary visual disorder or lesions to the occipital-temporal cortex (Zihl, 2000). Our findings suggest the presence of visual-neglect-like behavior, similar to that shown by Machner, Sprenger, Hansen et al. (2009) in line bisection and extending here to the SSA, bells, and scene copying tasks. The observation that these errors disappeared relatively quickly over time suggests that the underlying phenomenon was quite different from those resulting from definite spatial neglect (which were more stable over time). We did not explore late-stage patients and so probably missed the occurrence of the contralesional misorientation that is considered to be the classical consequence of hemianopia (Liepmann & Kalms, 1900; Barton & Black, 1998; Kerkhoff & Bucher, 2008;

Ferber & Karnath, 1999; Zihl et al., 2009; Kerkhoff & Schenk, 2011) and quadranopia (Kuhn et al., 2010). The disappearance of the neglect-like behavior appears to be an adaptive phenomenon that develops gradually over time (Machner, Sprenger, Hansen et al., 2009); it can occur spontaneously in daily living but could also be promoted by appropriate rehabilitation programs.

Further information on the early poststroke consequences of hemianopia can be found in the literature. Using line bisection tasks, Zihl et al. (2009) and Machner, Sprenger, Hansen et al. (2009) reported somewhat divergent results. Indeed, the first study found that the line bisection error was always contralesional and was independent of the time since brain injury, since it had the same intensity when investigated at <6 weeks, between 7 and 29 weeks and >30 weeks poststroke. In contrast, the second study reported a small but significant ipsilesional shift in patients explored less than one month after the stroke event. In terms of the estimated size of lateral, horizontal objects, patients with pure hemianopia tested in the chronic poststroke phase (3–17 months) showed a contralesional overestimation (underextension) and an ipsilesional underestimation (overextension) of lines, whereas patients with neglect and hemianopia showed the opposite pattern (i.e., contralesional underestimation) (Doricchi, Onida et al., 2002; Doricchi, Galati et al., 2002). However, when tested at the relatively acute stage (3–34 days poststroke), other patients with hemianopia and PCA infarction (Ferber & Karnath, 2001) showed contralesional overextension and ipsilesional underextension—which is relatively similar to what was found by the previous group in patients with neglect and hemianopia. Lateral eye patching simulates hemianopia and its immediate consequences have been investigated in both normal subjects and neglect patients. In normal subjects, Schuett, Kentridge, Zihl, & Heywood (2009) found that simulated hemianopia resulted in a bias in line bisection, which was on the same side as the preserved visual hemifield, and this is similar to what we observed in our patients at S1. However, a more recent study concluded that the bias was toward the impaired hemifield (Mitra, Abegg, Viswanathan, & Barton, 2010). In both studies, the eye-movement patterns shifted toward the side of the impaired visual field when exploring the line in terms of the amount of fixation, the fixation duration, saccadic amplitudes, and the spatial range covered by fixation. In neglect patients, hemispatial sunglasses placed over both eyes on the side ipsilateral to the lesion have shown positive short-term effects on line bisection, line cancellation, and figure copying performance

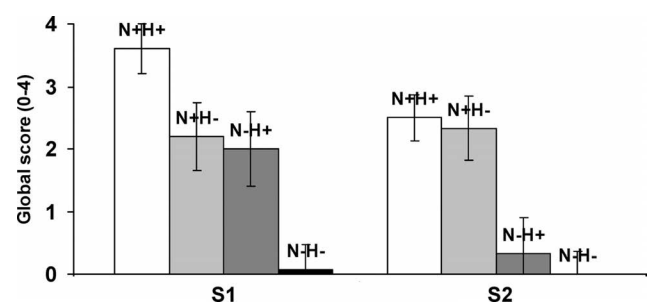


Figure 6. Severity of left omissions in the scene copying test (0–4): mean value and standard error in the four groups at the first (S1) and second (S2) assessments.

(Arai, Ohi, Sasaki, Nobuto, & Tanaka, 1997). Likewise, prolonged wearing of ipsilesional half-field patches has shown long-lasting effects on contralesional eye movements during a letter reading task (Beis, André, Baumgarten, & Challer, 1999) and performance in cancellation tests, drawing, and line bisection tests (Zeloni, Farnè, & Baccini, 2002). These results have been interpreted as either a consequence of greater eye movements and attention toward the contralesional visual field (due to overactivation of the damaged right hemisphere and right colliculus) or a reduction in the competitive advantage of the ipsilesional spatial representation. The involvement of subtle head and trunk postural changes has also been suggested (Zeloni et al., 2002).

The mechanism underlying the ipsilesional errors seen in the first few weeks following acute posterior brain lesion is probably complex. In the literature, many authors have discussed the mechanism of the late contralesional bias found in visual tasks (often specifically in line bisection). A loss of primary visual perception and an increase in eye fixation in the contralesional half-field have been highlighted (Barton & Black, 1998; Barton et al., 1998), in as much as the error can be found in simulated hemianopia (Mitra et al., 2010). Although the role of occipitotemporal cortex lesions has also been discussed (Zihl, 2000), the authors did not describe a perceptual, cognitive, or motor mechanism which could be involved in the visual error. Furthermore, this type of error can also be found in subjects without any brain lesions (Mitra et al., 2010). The influence of a combination of a shift in spatial attention and a reorientation of eye movements toward the contralesional space has also been suggested. Indeed, this type of overall misorientation (to the ipsilesional side) is classically found in patients with neglect. However, this hypothesis is not supported by the observation that the delayed orientation of attention to the contralesional side is relatively specific for visual information (Lewald et al., 2009). Similar mechanisms may underlie the ipsilesional error that we observed in various visuospatial tasks. Here, we have no clear idea of the putative, respective contributions of perceptual, oculomotor, representational, and attentional mechanisms. Following lateral eye patching in normal subjects, preferential eye movement is immediately oriented toward the contralesional side (Schuett, Kentridge, Zihl, & Heywood, 2009; Mitra et al., 2010). However, it is not known whether this also occurs in the few weeks following PCA-area infarction. In our series, one element suggesting a representation disorder was that the SSA showed an ipsilesional deviation in hemianopic patients. In this task, the response principally reflects the subjective position of the representation of the body midline and is less influenced by perceptual disorders. In fact, further studies are mandatory for examining if such patients have a reorientation of eye exploration, and if difficulties are only found in the visual domain.

In contrast to the situation in hemianopia, the consequences of pure neglect were relatively stable over a period of approximately 5–6 weeks. In fact, adaptation phenomena could be much less intense and slower for spatial neglect (due to parietal lesions) than for hemianopia (resulting from occipital injury).

Lastly, we observed relatively strong correlations between the reduction in SSA bias and recovery in the clinical tests (with the exception of line bisection). In the literature, relationships between SSA bias and difficulties in visual-spatial tests are subject to debate. Some authors have failed to observe a correlation (Bartolomeo & Chokron, 1999), whereas others have reported definite

relationships in assessments performed with the same body posture and visual environment (Richard, Honoré, Bernati, & Rousseaux, 2004; Kuhn et al., 2010). Our present observations on recovery argue in favor of a direct relationship between these two impairments and suggest that the SSA shift contributes to the spatial bias found in clinical tests.

In conclusion, the present study suggests that the effect of hemianopia on visual tasks is similar to that of spatial neglect in the first weeks following an acute hemispheric lesion but disappears within a few weeks (probably as a result of compensation). This change over time may explain (at least in part) the contradictory literature data.

References

- Arai, T., Ohi, H., Sasaki, H., Nobuto, H., & Tanaka, K. (1997). Hemispatial sunglasses: Effect on unilateral spatial neglect. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 78, 230–232. doi:10.1016/S0003-9993(97)90269-0
- Bartolomeo, P., & Chokron, S. (1999). Egocentric reference: Its role in spatial bias after right hemisphere lesions. *Neuropsychologia*, 37, 881–894. doi:10.1016/S0028-3932(98)00150-X
- Barton, J. J., & Black, S. E. (1998). Line bisection in hemianopia. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 64, 660–662. doi:10.1136/jnnp.64.5.660
- Barton, J. J. S., Behrmann, M., & Black, S. E. (1998). Ocular search during line bisection: The effects of hemi-neglect and hemianopia. *Brain*, 121, 1117–1131. doi:10.1093/brain/121.6.1117
- Beis, J. M., André, J. M., Baumgarten, A., & Challer, B. (1999). Eye patching in unilateral spatial neglect: Efficacy of two methods. *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, 80, 71–76. doi:10.1016/S0003-9993(99)90310-6
- Doricchi, F., Galati, G., DeLuca, L., Nico, D., & D'Olimpio, F. (2002). Horizontal space misrepresentation in unilateral brain damage. I. Visual and proprioceptive-motor influences in left unilateral neglect. *Neuropsychologia*, 40, 1107–1117. doi:10.1016/S0028-3932(02)00010-6
- Doricchi, F., Onida, A., & Guariglia, P. (2002). Horizontal space misrepresentation in unilateral brain damage. II. Eye-head centered modulation of visual misrepresentation in hemianopia without neglect. *Neuropsychologia*, 40, 1118–1128. doi:10.1016/S0028-3932(02)00011-8
- Farnè, A., Ponti, F., & Ladavas, E. (1998). In search of biased egocentric reference frames in neglect. *Neuropsychologia*, 36, 611–623. doi:10.1016/S0028-3932(97)00164-4
- Ferber, S., & Karnath, H. O. (1999). Parietal and occipital lobe contributions to perception of straight ahead orientation. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 67, 572–578. doi:10.1136/jnnp.67.5.572
- Gauthier, L., Dehaut, F., & Joanette, Y. (1989). The Bell Test: A quantitative and qualitative test for visual neglect. *International Journal of Clinical Neuropsychology*, 11, 49–53.
- Halligan, P. W., Marshall, J. C., & Wade, D. T. (1990). Do visual field deficits exacerbate visuo-spatial neglect? *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 53, 487–491. doi:10.1136/jnnp.53.6.487
- Heilman, K. M., & Valenstein, E. (1979). Mechanisms underlying hemispatial neglect. *Annals of Neurology*, 5, 166–170. doi:10.1002/ana.410050210
- Kerkhoff, G., & Bucher, L. (2008). Line bisection as an early method to assess homonymous hemianopia. *Cortex*, 44, 200–205. doi:10.1016/j.cortex.2006.07.002
- Kerkhoff, G., & Schenk, T. (2011). Line bisection in homonymous visual field defects - Recent findings and future directions. *Cortex*, 47, 53–58. doi:10.1016/j.cortex.2010.06.014
- Kooistra, C. A., & Heilman, K. M. (1989). Hemispatial visual inattention masquerading as hemianopia. *Neurology*, 39, 1125–1127.
- Kuhn, C., Heywood, C., & Kerkhoff, G. (2010). Oblique spatial shifts of subjective visual straight ahead orientation in quadrantic visual field defects. *Neuropsychologia*, 48, 3205–3210. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.06.035

- Lewald, J., Peters, S., Tegenthoff, M., & Hausmann, M. (2009). Dissociation of auditory and visual straight ahead in hemianopia. *Brain Research*, 1287, 111–117. doi:10.1016/j.brainres.2009.06.085
- Liepmann, H., & Kalmus, E. (1900). Über eine Augenmaassstörung bei Hemianopikern. *Berliner Klinische Wochenschrift*, 37, 838–842.
- Machner, B., Sprenger, A., Hansen, U., Heide, W., & Helmchen, C. (2009). Acute hemianopic patients do not show a contralesional deviation in the line bisection task. *Journal of Neurology*, 256, 289–290. doi:10.1007/s00415-009-0148-3
- Mitra, A. R., Abegg, G. M., Viswanathan, J., & Barton, J. J. (2010). Line bisection in simulated homonymous hemianopia. *Neuropsychologia*, 48, 1742–1749. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2010.02.023
- Ogden, J. A. (1985). Anterior-posterior interhemispheric differences in the loci of lesions producing visual hemineglect. *Brain and Cognition*, 4, 59–75. doi:10.1016/0278-2626(85)90054-5
- Richard, C., Honoré, J., Bernati, T., & Rousseaux, M. (2004). Straight-ahead pointing correlates with long-line bisection in neglect patients. *Cortex*, 40, 75–83. doi:10.1016/S0010-9452(08)70921-3
- Rorden, C., & Brett, M. (2000). Stereotaxic display of brain lesions. *Behavioural Neurology*, 12, 191–200.
- Rousseaux, M., Beis, J. M., Pradat-Diehl, P., Martin, Y., Bartolomeo, P., Bernati, T., & Azouvi, P. (2001). Batterie de dépistage de la négligence spatiale. Normes et effets de l'âge, du niveau d'éducation, du sexe, de la main et de la latéralité. *Revue Neurologique (Paris)*, 157, 1385–1400.
- Rousseaux, M., Bernati, T., Saj, A., & Kozłowski, O. (2006). Ineffectiveness of prism adaptation on spatial neglect signs. *Stroke*, 37, 542–543. doi:10.1161/01.STR.0000198877.09270.e8
- Saj, A., Honoré, J., Davroux, J., Coello, Y., & Rousseaux, M. (2005). Effect of posture on the perception of verticality in neglect patients. *Stroke*, 36, 2203–2205. doi:10.1161/01.STR.0000182236.73502.19
- Saj, A., Honoré, J., Richard, C., Bernati, T., & Rousseaux, M. (2008). Reducing rightward bias of subjective straight ahead in neglect patients by changes in body orientation. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry*, 79, 991–996. doi:10.1136/jnnp.2007.124412
- Saj, A., Honoré, J., Richard, C., Bernati, T., & Rousseaux, M. (2010). Hemianopia and neglect influence on straight-ahead perception. *European Neurology*, 64, 297–303. doi:10.1159/000321420
- Schenkenberg, T., Bradford, D. C., & Ajax, E. T. (1980). Line bisection and unilateral visual neglect in patients with neurological impairment. *Neurology*, 30, 509–517.
- Schuett, S., Kentridge, R. W., Zihl, J., & Heywood, C. A. (2009). Is the origin of the hemianopic line bisection error purely visual? Evidence from eye movements in simulated hemianopia. *Vision Research*, 49, 1668–1680.
- Schuett, S., Dauner, R., & Zihl, J. (2011). Line bisection in unilateral homonymous visual field defects. *Cortex*, 47, 47–52. doi:10.1016/j.cortex.2010.01.008
- Vallar, G., Sandroni, P., Rusconi, M. L., & Barbieri, S. (1991). Hemianopia, hemianesthesia, and spatial neglect: A study with evoked potentials. *Neurology*, 41, 1918–1922.
- Zeloni, G., Farnè, A., & Baccini, M. (2002). Viewing less to see better. *Journal of Neurology Neurosurgery and Psychiatry*, 73, 195–198. doi:10.1136/jnnp.73.2.195
- Zihl, J. (2000). *Rehabilitation of visual disorders after brain injury*. Hove, UK: Psychology Press.
- Zihl, J., Sämann, P., Schenk, T., Schuett, S., & Dauner, R. (2009). On the origin of line bisection error in hemianopia. *Neuropsychologia*, 47, 2417–2426. doi:10.1016/j.neuropsychologia.2009.04.009

Received February 2, 2011

Revision received July 18, 2011

Accepted August 1, 2011 ■